



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de la terre et l'univers
Département des sciences de la nature et de la vie
Filière : Sciences biologiques

Référence / 2025

MÉMOIRE DE MASTER

Spécialité : Biochimie Appliquée

Présenté et soutenu par :
MAANNESER Ferial et MATALLAH Mohammed

Le: **lundi 2 juin 2025**

*Valorisation des résidus de l'hydrodistillation de
la plante *Salvia hispanica* L. pour le
développement d'un biofilm alimentaire enrichi
en composés phénoliques*

Jury :

Dr.	NEFOUCI Fatima	MAA	Université de Biskra	Président
Dr.	DEGHIMA Amirouche	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	DJENIDI Habiba	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu, de nous avoir accordé la force, la patience et la clarté d'esprit nécessaires tout au long de notre parcours universitaire. C'est grâce à Sa guidance et à Sa miséricorde que ce travail a pu voir le jour.

Nous remercions avec une sincère reconnaissance le Dr. DEGHIMA AMIROUCHE, dont la rigueur scientifique et la vision claire ont tracé une voie sur laquelle nous avons pu avancer avec confiance. Ses remarques pertinentes et sa disponibilité constante ont enrichi ce travail bien au-delà des mots. C'est un privilège d'avoir pu bénéficier de son encadrement.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants de l'université. Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail, ainsi que les ingénieurs de laboratoire pour leur assistance technique et leur disponibilité tout au long de notre travail.

Dédicace

À l'ombre de tout travail accompli se tiennent souvent des présences discrètes mais essentielles. Ce mémoire n'est pas seulement le fruit de recherches et d'expérimentations, mais aussi celui d'un environnement humain stimulant, bienveillant et inspirant.

Je dédie ce travail à ma chère mère, dont l'amour incommensurable, le soutien sans faille et les sacrifices constants m'ont permis d'avancer et de surmonter toutes les épreuves. Tu es mon guide et ma force.

À mon père, qui n'est plus parmi nous, mais dont la mémoire et l'influence demeurent présentes dans chaque étape de mon parcours. Ta sagesse, ton courage et ton amour continuent de m'inspirer chaque jour. Cette réussite est en grande partie la tienne, et je te porte dans mon cœur à chaque instant.

À mes sœurs et frères, pour leur présence constante, leur encouragement et leur amour, qui ont été des moteurs essentiels tout au long de ce chemin. Vous êtes ma force et ma source d'inspiration.

À ma famille et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Ferial

Dédicace

Louange à Dieu, par qui toute chose s'accomplit.

Je dédie ce travail, fruit de persévérance et de passion, À l'âme de mon cher père, que Dieu ait son âme en paix, qui, malgré son absence, reste vivant dans mon cœur, par ses valeurs, ses conseils, et son amour inconditionnel.

À ma mère bien-aimée, pilier de tendresse, de patience et de prières silencieuses, À ma famille, pour leur présence constante et leur soutien sans faille,

À mes enseignants et encadrant, pour leur précieuse transmission du savoir et leurs encouragements,

À mes amis et collègues, pour leur camaraderie sincère et leur soutien dans les moments de doute,

Et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à rendre ce parcours possible...

Toute ma gratitude vous est destinée. Ce modeste aboutissement est aussi le fruit de votre soutien.

Mohammed

Table des matières

Remerciements

Dédicace

Tables des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction.....1

Première partie : Partie théorique

Chapitre 1 : Les biofilms comestibles : Concepts et applications

1.1. Définition et principes 3

1.2. Sources biologiques des biopolymères utilisés dans les biofilms comestibles 3

1.3. Les additifs pour améliorer la fonctionnalité des biofilms 4

1.4. Avantages des biofilms comestibles..... 4

1.4.1. Avantages environnementaux 4

1.4.2. Avantages technologiques 5

Chapitre 2: Le mucilage des graines de chia comme biopolymère filmogène

2.1. Généralités sur la plante chia (*Salvia hispanica L.*) 6

2.2. Classification botanique de l'espèce..... 6

2.3. Origine et extraction de mucilage..... 7

2.4. Composition des graines de chia et propriétés physico-chimiques de leur mucilage.... 8

2.5. Fonctionnalités dans les films comestibles 9

2.6. Exemples d'utilisation dans l'emballage alimentaire..... 10

Chapitre 3: Valorisation des déchets d'hydrodistillation des plantes aromatiques

3.1. Nature des déchets 11

3.2. Potentiel bioactif résiduel (polyphénols) 11

3.3. Intérêts antimicrobiens et antioxydants dans les films 12

Deuxième partie: partie expérimentale

Chapitre 4: Matériel et méthodes

4.1. Matériel.....	13
4.1.1. Matériel végétal.....	13
4.2. Méthodes	14
4.2.1. Obtention des résidus de <i>Salvia hispanica L.</i>	14
4.2.2. Rendement d'extraction.....	15
4.2.3. Dosage des polyphénols totaux	15
4.2.4. Dosage des flavonoïdes totaux	15
4.2.5. Test de pouvoir réducteur	16
4.2.6. Capacité antioxydante totale	16
4.2.7. Test de piégeage du radical DPPH.....	16
4.3. Extraction du mucilage des graines de <i>Salvia hispanica L.</i>	17
4.4. Préparation de biofilm	17
4.5. Application de la solution filmogène en tant que bio-emballage.....	18
4.5.1. Enrobages des bananes et des tomates.....	18
4.5.2. Analyse sensorielle des bananes enrobées	19

Chapitre 5: Résultats et discussion

5.1. Rendement de résidu liquides et hydro-éthanolique	20
5.2. Dosage des polyphénols totaux	20
5.3. Dosage des flavonoïdes totaux.....	23
5.4. Test de pouvoir réducteur	25
5.5. Capacité antioxydante total (TAC)	27
5.6. Test de piégeage du radical DPPH	29
5.7. Extraction du mucilage	31
5.8. Apparence de biofilm	31

5.9. Application de la solution filmogène en tant que bio-emballage.....	32
5.9.1. Effet du biofilm sur la durée de conservation des fruits	32
Conclusion.....	39
Références bibliographiques.....	41
Résumés	

Liste des Tableaux

Tableau 1. Composés utilisés comme base pour les films et revêtements comestibles et leurs principales sources biologiques.....	3
Tableau 2. Classification botanique de l'espèce.....	7
Tableau 3. Composition nutritionnelle et bioactive des graines de <i>Salvia hispanica L</i>	8

Liste des Figures

Figure 1. Feuilles de <i>Salvia hispanica</i> L. Fleurs et graines.....	6
Figure 2. Graines de Chia à l'état naturel et après hydratation.....	7
Figure 3. Valorisation des sous-produits résiduels issus de la production d'huiles essentielles de plantes aromatiques.....	11
Figure 4. Le matériel végétal constitue des parties aériennes de <i>Salvia hispanica</i> L. Utilisées pour l'extraction.....	13
Figure 5. Dispositif d'hydrodistillation de type Clevenger.....	14
Figure 6. Histogramme représentant le rendement des résidus de l'hydrodistillation de la partie aérienne de <i>Salvia hispanica</i> L.....	20
Figure 7. Droite d'étalonnage de l'acide gallique pour le dosage des polyphénols totaux.....	21
Figure 8. Histogramme représentant la teneur en polyphénols des résidus de l'hydrodistillation de la partie aérienne de <i>Salvia hispanica</i> L exprimé en $\mu\text{g EAG/mg d'extrait}$	21
Figure 9. Droite d'étalonnage de quercétine pour le dosage des flavonoïdes totaux.....	23
Figure 10. Histogramme représentant la teneur en flavonoides des résidus de l'hydrodistillation de la partie aérienne de <i>Salvia hispanica</i> L exprimé en $\mu\text{g EQ/mg d'extrait}$	23
Figure 11. Droite d'étalonnage de l'acide ascorbique de test de pouvoir réducteur.....	25
Figure 12. Résultats de la comparaison du pouvoir réducteur des résidus et des standards exprimés en $\mu\text{g EAA/mg d'extrait}$	26
Figure 13. . Droite d'étalonnage de l'acide ascorbique de la capacité antioxydante totale.....	28
Figure 14. . Résultats de la comparaison de TAC des résidus et des standards exprimés en $\mu\text{g EAA/mg d'extrait}$	28
Figure 15. Mucilage de <i>Salvia hispanica</i> L. avant et après séchage.....	31
Figure 16. Apparence de biofilm sans extrait.....	31
Figure 17. Apparence de biofilm fortifié avec extrait 4 %.....	32
Figure 18. Aspect des fruits enrobés « RL 1% » et non enrobés en fonction de la durée de stockage.....	33
Figure 19. Aspect des fruits enrobés « RS 1% » et non enrobés en fonction de la durée de stockage.....	34
Figure 20. Aspect des fruits enrobés « RL 4% » et non enrobés en fonction de la durée de stockage.....	35
Figure 21. Aspect des tomates enrobées et non enrobées en fonction de la durée de stockage...	37

Liste des abréviations

Ac : Absorbance du témoin

AG : Acide gallique

At : Absorbance de l'échantillon testé

CE : Concentration efficace

DPPH : 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl

E : Eau

EAA : Equivalence d'acide ascorbique

EAG : Equivalence d'acide gallique

EQ : Equivalence de quercétine

H : Hydrolat

IC : Concentration inhibitrice

M : Mucilage de Chia

M+E : Mucilage + Eau

M+H : Mucilage + Hydrolat

M+R : Mucilage + Résidu + Hydrolat

MS : Matière sèche

PPO : Polyphénol oxydase

Q : Quercétine

R : Rendement

RL : Résidu liquide

RS : Résidu solide

T : Témoin

TAC : Capacité antioxydante totale

Introduction

Les consommateurs recherchent de plus en plus des produits alimentaires faciles d'accès et de qualité. L'industrie de l'emballage contribue à la production de produits sains et à la réduction du gaspillage alimentaire grâce à l'utilisation de nouveaux matériaux et de nouvelles méthodes. Les emballages alimentaires ont été développés pour protéger les aliments de la chaleur, de la lumière, de l'humidité, de l'oxygène, des micro-organismes, des insectes et de la poussière. Les films biodégradables pour emballages alimentaires intelligents constituent l'une des nouvelles méthodes dans ce domaine. La plupart des polymères synthétiques d'origine pétrolière, tels que les polyoléfines, les nylons, le polystyrène, etc., résistent à la biodégradation et leurs composés carbonés ne sont pas décomposés par les enzymes des micro-organismes (Pirsa *et al.*, 2022).

La consommation croissante de plastique synthétique dérivé du pétrole, ainsi que sa lente dégradation et les problèmes de recyclage de ces matériaux, ont entraîné une importante accumulation dans l'environnement au cours des dernières décennies. Ceci conduit à un grave problème de pollution en raison de sa non-biodégradabilité. Les préoccupations environnementales croissantes des consommateurs concernant les effets nocifs des emballages et revêtements en plastique ont conduit à des recherches sur les emballages axés sur les films biodégradables fabriqués à partir de sources renouvelables et respectueuses de l'environnement comme substitut approprié aux plastiques conventionnels. En réponse à cela, les chercheurs et l'industrie agroalimentaire recherchent des matériaux alternatifs pour le revêtement des aliments, composés d'ingrédients naturels, sûrs, renouvelables et recyclables qui augmentent leur biodégradabilité, leur biocompatibilité et leur comestibilité. Les polymères biosourcés, tels que les polysaccharides, les lipides, les protéines ou une combinaison de ceux-ci, sont les matériaux les plus courants et les plus prometteurs pour le développement de films et revêtements biodégradables (Muñoz-Tébar *et al.*, 2022).

Nous reconnaissons la nécessité impérieuse de s'attaquer au problème des composés bioactifs précieux restant dans les résidus d'extraits végétaux. Dans divers procédés d'extraction, notamment l'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation, malheureusement, ces substances précieuses sont souvent négligées et jetées comme déchets dans de nombreux laboratoires de recherche expérimentale et opérations industrielles. Ne pas aborder ce problème revient à gaspiller une ressource précieuse (Nilofar *et al.*, 2024). Dans ce contexte, La chia (*Salvia hispanica* L.), est une plante originaire d'Amérique centrale, largement valorisée à

l'échelle industrielle pour ses graines riches en acides gras oméga-3, protéines, fibres et antioxydants. Bien que l'usage des graines soit bien établi dans les domaines de la nutrition et de la santé, certaines graines productrices de mucilage comme les graines de chia, et sont donc principalement utilisées pour obtenir des huiles riches en cet acide gras essentiel. Cela génère une grande quantité de sous-produits, tels que les graines dégraissées, qui, une fois broyées, peuvent également être utilisées pour obtenir du mucilage pour la production de films et d'enrobages comestibles et biodégradables tandis que les autres parties de la plante, en particulier les parties aériennes (tiges, feuilles et fleurs) demeurent encore peu exploitées, malgré leur potentiel biochimique intéressant (Muñoz-Tébar *et al.*, 2022). Dans le cadre de cette étude, nous formulons les hypothèses suivantes :

Le mucilage extrait des graines de chia permet de former un biofilm stable adapté à l'enrobage.

L'enrichissement du biofilm en polyphénols issus des sous-produits de chia (*Salvia hispanica* L.) augmente ses propriétés antioxydantes et antimicrobiennes.

Par conséquent, l'objectif principal de nos recherches en cours est de valoriser les résidus issus de l'hydrodistillation des parties aériennes de *Salvia hispanica* L. à travers une approche intégrée et durables. Afin d'atteindre cet objectif principal, plusieurs objectifs spécifiques ont été définis comme suit :

Explorer la récupération des composés bioactifs, notamment les polyphénols et flavonoïdes, présents dans les résidus issus de l'hydrodistillation de chia, ainsi qu'à estimer leur teneur en composés antioxydants afin de mieux comprendre leur potentiel fonctionnel.

Extraire le mucilage à partir des graines de chia pour servir de matrice filmogène.

Incorporer les extraits polyphénoliques issus des résidus dans le mucilage pour formuler des biofilms comestibles renforcés.

Évaluer l'efficacité de ces biofilms dans le prolongement de la durée de conservation de produits alimentaires périssables tels que la banane et la tomate.

Première partie

Partie théorique

Chapitre 1

Les biofilms comestibles : Concepts et applications

1.1. Définition et principes

Les films et revêtements comestibles sont de fines couches appliquées sur les aliments dans le but d'en prolonger la durée de conservation. Comestibles avec le produit, Ils agissent comme une barrière protectrice en remplaçant ou renforçant les couches naturelles de l'aliment, ils contribuent à maintenir la qualité des aliments en les protégeant contre diverses altérations physiques, chimiques et microbiologiques, telles que la déshydratation, le brunissement enzymatique ou encore l'oxydation des lipides. L'épaisseur de ce type de revêtement est généralement inférieure à 0,3 mm (Kocira *et al.*, 2021).

1.2. Sources biologiques des biopolymères utilisés dans les biofilms comestibles

Les biopolymères sont des macromolécules d'origine naturelle, produites par les plantes, les animaux ou les micro-organismes. Ils incluent des polysaccharides, des protéines. Grâce à leur origine naturelle, ces matériaux sont biodégradables, biocompatibles et entièrement compostables, ce qui en fait une alternative écologique aux polymères synthétiques dans le domaine de l'emballage (Kola & Carvalho, 2023).

Le Tableau 01 présente les principaux composés utilisés comme matrices dans la formulation de films et revêtements comestibles, en précisant leurs sources respectives telles que les plantes, les macroalgues, les animaux et les micro-organismes (Martins *et al.*, 2024).

Tableau 1. Composés utilisés comme base pour les films et revêtements comestibles et leurs principales sources biologiques (Kola & Carvalho, 2023).

Classe	Plante	Macroalgue	Animale	Microorganisme
Polysaccharide	Pectin, amidon, cellulose, dextrane...	Alginate, agar, Carraghénane ...	Chitosane	Alginate, cellulose, chitosane, Pullulan, xanthane
Protéine	Gluten, Zéine...	-	Caséine, gelatin	-
Lipide	Glycéride, cire	-	Cire, glycéride	-
Autrepolymère	-	-	-	Polyhydroxyalcanoate (PHA) Polyhydroxybutyrate (PHB)...

1.3. Les additifs pour améliorer la fonctionnalité des biofilms

La fabrication des films comestibles implique plusieurs étapes physiques et chimiques destinées à former des structures protectrices à la fois efficaces et fonctionnelles. Divers agents actifs tels que des antioxydants, des antimicrobiens, des colorants, des arômes ou des plastifiants peuvent être incorporés à la solution de base afin d'optimiser les propriétés du produit final (Kola & Carvalho, 2023).

L'ajout de plastifiants et d'émulsifiants aux solutions filmogènes vise à améliorer leurs propriétés mécaniques ou à augmenter la stabilité lorsque des lipides et des hydrocolloïdes sont combinés, à prévenir la rupture du film et à faciliter la manipulation et le stockage, car ils apportent flexibilité et élasticité en réduisant les forces intermoléculaires et en augmentant la mobilité de la chaîne polymère (Pires *et al.*, 2024).

Les matières végétales offrent une riche source d'antioxydants naturels, de plus en plus valorisés dans l'industrie agroalimentaire. Intégrer des extraits végétaux dans les films d'emballage biodégradables permet non seulement d'apporter une action antimicrobienne, mais aussi d'améliorer les propriétés du matériau, prolongeant ainsi la conservation des aliments et renforçant la durabilité de l'emballage (Mir *et al.*, 2018). Ce type d'emballage, riche en antioxydants issus de composés polyphénoliques et autres, répond à la demande des consommateurs pour des alternatives sans additifs synthétiques. Il peut contribuer à limiter l'oxydation, principale cause de détérioration de la qualité des aliments (Kola & Carvalho, 2023).

1.4. Avantages des biofilms comestibles

Les biofilms comestibles présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux revêtements synthétiques tant sur le plan environnemental que technologique.

1.4.1. Avantages environnementaux

Les films et revêtements comestibles représentent une alternative prometteuse aux emballages plastiques conventionnels. Leur principal avantage réside dans le fait qu'ils peuvent être consommés avec les aliments, évitant ainsi la nécessité de les retirer avant consommation. En plus de leur comestibilité, ces matériaux permettent de stabiliser les denrées alimentaires en prolongeant leur durée de conservation et en préservant leur intégrité physique. Ils sont

également biodégradables, renouvelables, généralement non toxiques et présentent un faible impact environnemental (Pires *et al.*, 2024).

1.4.2. Avantages technologiques

Barrière contre les gaz est l'humidité ce qui permet de préserver la qualité et la fraîcheur des fruits et légumes et prolonger leur durée de conservation. Ces films agissent comme une protection antimicrobienne permettant de maintenir une bonne hygiène des aliments (Kocira *et al.*, 2021).

La possibilité d'incorporer des antioxydants, des anti-brunissements, des colorants, arômes, nutriments et épices afin d'améliorer la sécurité et les qualités nutritionnelles et sensorielles des aliments (Kocira *et al.*, 2021).

Chapitre 2

Le mucilage des graines de Chia comme biopolymère filmogène

2.1. Généralités sur la plante chia (*Salvia hispanica* L.)

Le genre *Salvia* se compose environ 900 espèces, le chia, scientifiquement nommée *Salvia hispanica* L., est une plante herbacée annuelle appartenant à la famille des Lamiacées originaire du Mexique et du nord du Guatemala (Abdelhalim & Hanrahan, 2021). Auparavant, le chia était cultivé uniquement au Mexique et au Guatemala, mais aujourd'hui sa production s'étend à nombreux pays. Le Mexique demeure le principal producteur de chia au monde (Knez Hrnčič, et al., 2019).

Elle peut atteindre jusqu'à un mètre de hauteur et possède des feuilles allongées (Figure 1), dentelées et opposées le long de la tige, mesurant entre 4 et 8 cm de long pour 3 à 5 cm de large. Ses fleurs, bisexuées, de couleur blanche ou violette, sont regroupées en verticilles et présentent une forme labiée caractéristique de la famille des Lamiacées (comme la menthe). Elles mesurent environ 3 à 4 mm. Les graines, de forme ovale et de 1 à 2 mm de long, peuvent être uniformes ou tachetées, et leur couleur varie du blanc au gris ou au noir (Motyka et al., 2022).



Figure 1. Feuilles de *Salvia hispanica* L à gauche, Fleurs en milieu (Prathyusha et al., 2019) et Graines à droite (Motyka et al., 2022)

2.2. Classification botanique de l'espèce

La classification de la plante *Salvia hispanica* L. est montrée dans le Tableau 2.

Tableau 2 .Classification botanique de *Salvia hispanica* L selon (Aslam *et al.*, 2020)

Règne	Plantae
Subdivision	Spermatophyta
Ordre	Lamiales
Famille	Lamiaceae
Genre	<i>Salvia</i>
Espèce	<i>Salvia hispanica</i>

2.3. Origine et extraction de mucilage

Le mucilage se présente sous la forme d'une substance épaisse et gélatineuse de couleur jaune clair, inodore et très visqueux, comme le montre la Figure 2. Il entoure les graines après hydratation et qui se révèle très riche en glucides. Ces polysaccharides, constituant le réseau de mucilage, sont situés dans les trois couches externes du tégument de la graine, formant le tégument (Ramos *et al.*, 2023; Mensah *et al.*, 2024).

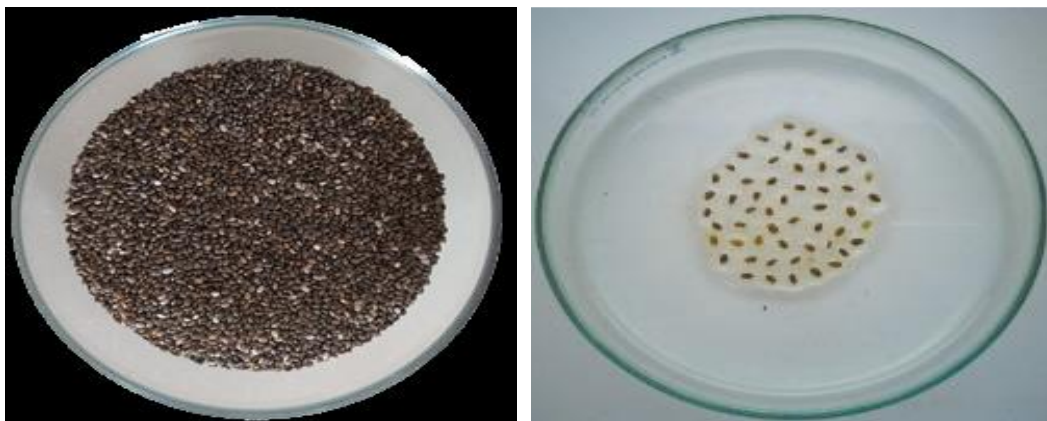


Figure 2. Graines de chia à l'état naturel « à gauche » ; après 30 minutes d'hydratation « à droite » (da Silveira Ramos *et al.*, 2021)

Plusieurs méthodes ont été développées pour extraire le mucilage des graines de chia, et les conditions d'extraction (température, durée, rapport graines/eau, pH, force ionique) influencent fortement le rendement, la pureté et les propriétés fonctionnelles du produit. L'extraction débute généralement par l'hydratation des graines pour permettre l'exsudation du mucilage dans un milieu aqueux. Sa séparation peut ensuite se faire par agitation avec du sable, centrifugation, ou

filtration sous vide, suivie d'un séchage. D'autres approches consistent à déshydrater directement le mucilage liquide, puis à le récupérer par tamisage. Une méthode plus récente, décrite dans un brevet, associe bain à ultrasons et filtration à haute pression, mais elle est lente et ne fournit pas de données sur les propriétés du mucilage. En comparaison, l'ultrason à corne, plus puissant, pourrait constituer une alternative prometteuse pour améliorer l'efficacité de l'extraction (Wang *et al.*, 2022).

2.4. Composition des graines de chia et propriétés physico-chimiques de leur mucilage

Salvia hispanica L. est une pseudo-céréale qui a été consommée par la population mondiale en raison de ses propriétés protectrices, fonctionnelles et antioxydantes attribuées à la présence de lipides, de fibres alimentaires, de protéines, de composés phénoliques, de vitamines et de minéraux (Prathyusha *et al.*, 2019) comme le montre le **Tableau 3**. Selon Motyka *et al.* (2022) les graines de chia contiennent :

Tableau 3. Composition nutritionnelle et bioactive des graines de *Salvia hispanica* L.

Catégorie	Composant	Détails
Lipides	30–33 %	Majoritairement acides gras oméga-3 (acide alpha-linolénique, 60 %) et oméga-6 (acide linoléique, ~20 %)
Glucides	26–41 %	Dont 30–40 % de fibres alimentaires majoritairement insolubles (85–93 %), incluant cellulose, hémicellulose, lignine et pectine
Protéines	15–25 %	Principalement globulines (52 %), contenant des acides aminés essentiels et non essentiels
Polyphénols	-	Acides phénoliques : rosmarinique, gallique, caféique ; flavonoïdes : quercétine, rutoside ; isoflavones ; tanins et caroténoïdes.
Minéraux	-	Calcium, phosphore, potassium, magnésium, fer, zinc, sélénium, etc.
Vitamines	-	Vitamines B (B1, B2, B3), C, E et A

Quant au mucilage de chia est défini comme des polysaccharides hydrosolubles constitués de grosses molécules de sucres et d'acides uroniques liés par des liaisons glycosidiques. Il comprend de l'humidité, des glucides (y compris des monosaccharides), des protéines, des lipides, des cendres et des acides uroniques. Lorsqu'elles sont en contact avec l'eau, les fibres solubles du chia forment un gel mucilagineux transparent qui adhère aux couches externes de la graine. Ce mucilage est composé principalement de d-xylose, d- α -glucose et acide 4-O-méthyl- α -d-glucuronique dans un ratio de 2:1:1 respectivement (Salgado-Cruz *et al.*, 2013). Ce dérivé végétal possède des propriétés telles qu'une forte capacité de rétention d'eau, un modificateur de texture, en plus des comportements d'agent émulsifiant, gélifiant et encapsulant. ces propriétés ouvrent un large potentiel d'utilisation dans diverses applications dans l'industrie alimentaire (da Silveira Ramos *et al.*, 2021).

2.5. Fonctionnalités dans les films comestibles

Grâce à ses excellentes propriétés, notamment sa forte viscosité et sa capacité à retenir l'eau, le mucilage de chia apparaît comme un matériau prometteur pour la fabrication d'emballages comestibles (Charles-Rodríguez *et al.*, 2020).

Il est une source de biopolymères pour la production de films, les graines de chia constituent une option car elles présentent une teneur élevée en matière mucilagineuse, environ 5 à 7 % de leur poids total, libérée au contact de l'eau. Le mucilage est une combinaison de xylose, de glucose et d'acide glucuronique et contient également une forte teneur en hémicellulose, qui crée des propriétés barrières entre les aliments et l'environnement lorsqu'il est utilisé comme film. les films étaient de bons candidats pour une utilisation dans l'industrie alimentaire en raison de leur résistance aux températures et au pH élevés (Sánchez Vázquez *et al.*, 2025).

Les biopolymères offrent des avantages notables par rapport aux matériaux d'emballage traditionnels, notamment leur innocuité pour la santé et leur respect de l'environnement. Des recherches récentes montrent que les films à base de mucilage, comme celui de chia, peuvent contribuer à prolonger la durée de conservation des aliments. Les films et enrobages comestibles à base de polysaccharides et de protéines agissent comme barrières aux gaz, à l'humidité et aux arômes, tout en pouvant intégrer des agents fonctionnels (antioxydants, antimicrobiens, nutriments) pour améliorer la qualité, l'utilité et la sécurité des aliments (Deshmukh *et al.*, 2025).

De plus, Ils sont peu coûteux, faciles à extraire avec un bon rendement, et issus de sources naturelles et renouvelables (Beikzadeh *et al.*, 2020).

2.6. Exemples d'utilisation dans l'emballage alimentaire

On observe actuellement une forte croissance de la demande en produits alternatifs, notamment ceux adaptés aux personnes ayant des restrictions alimentaires, comme les individus allergiques ou intolérants au gluten. Dans ce contexte, l'utilisation de gommes naturelles, telles que le mucilage de chia, apparaît comme une solution pertinente et prometteuse. Ces biomatériaux trouvent de nombreuses applications dans l'industrie agroalimentaire : ils servent de fibres alimentaires, d'agents épaississants, gélifiants, émulsifiants, stabilisants, de substituts de matières grasses, ainsi que d'agents clarifiants et floculants. En outre, ils sont utilisés dans la fabrication de films comestibles, l'encapsulation d'arômes et de colorants alimentaires, ainsi que pour prévenir la cristallisation (Ramos *et al.*, 2023).

Chapitre 3

Valorisation des déchets d'hydrodistillation des plantes aromatiques

3.1. Nature des déchets

Lors de l'hydrodistillation des huiles essentielles, un volume considérable de sous-produits se forme, à savoir de l'eau résiduelle et des solides résiduels (Figure 3). Ces derniers sont la plupart du temps considérés comme des déchets. Cependant, ces résidus présentent des activités biologiques très intéressantes, car ils contiennent encore des composés non volatils ainsi que des molécules plus polaires. Ils peuvent donc être considérés comme un matériau précieux pour diverses utilisations (Rafya *et al.*, 2024). L'hydrolat est le sous-produit aqueux de la distillation qui se compose de dispersions colloïdales de l'huile essentielle et des composants hydrosolubles, volatiles de la matière végétale (Ortiz de Elguea-Culebras *et al.*, 2022).

Le recyclage des résidus de plantes aromatiques méditerranéennes comme sources de composés phénoliques a suscité un vif intérêt auprès des chercheurs et des industries des huiles essentielles au cours des vingt dernières années (de Elguea-Culebras *et al.*, 2022).

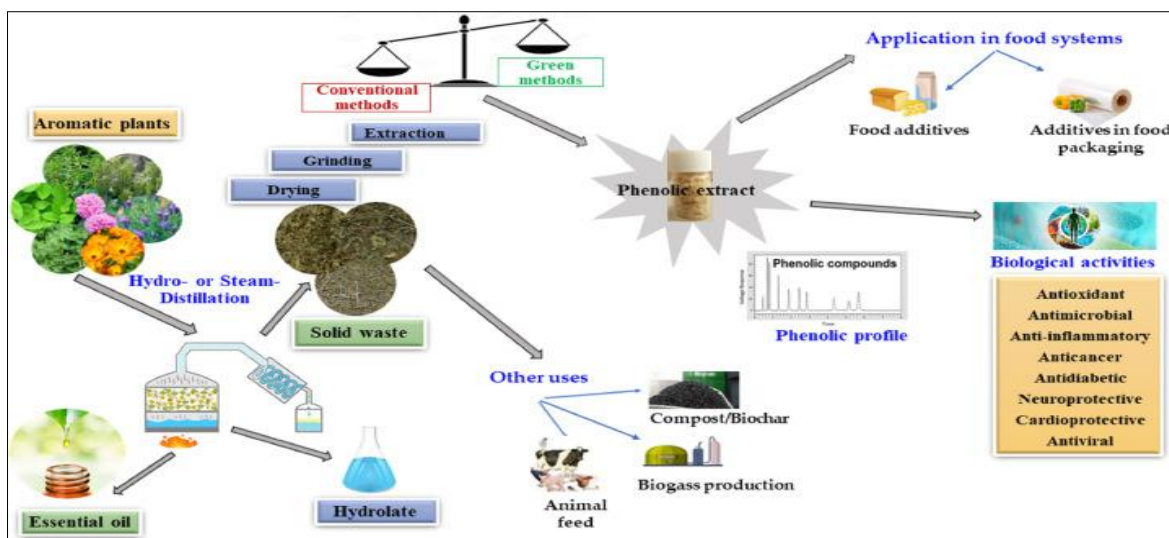


Figure 3. Valorisation des sous-produits résiduels issus de la production d'huiles essentielles de plantes aromatiques (Skendi *et al.*, 2022).

3.2. Potentiel bioactif résiduel (polyphénols)

Malgré un faible rendement en huile (environ 0,5 %), la production d'huiles essentielles génère une biomasse résiduelle abondante et sous-exploitée. Cette ressource, contenant des métabolites secondaires stables à la chaleur comme les flavonoïdes et les polyphénols, présente

un fort potentiel pour la bioéconomie circulaire en tant que source de composés aux activités antioxydantes, anti-âge et antimicrobiennes (Khiri *et al.*, 2025).

Les extraits hydrosolubles récupérés à partir des parties aériennes de plusieurs plantes aromatiques extraites de l'huile essentielle par distillation à la vapeur se sont révélés posséder des propriétés antioxydantes. Les sous-produits restant après la distillation à l'eau des huiles essentielles des parties aériennes de deux espèces de *Salvia* se sont révélés contenir des quantités considérables de flavonoïdes. Il a déjà été démontré que l'extrait éthanolique obtenu à partir des sous-produits de matière végétales de *Salvia officinalis* présentait une activité antimicrobienne contre les bactéries, les levures et les champignons (Veličković *et al.*, 2008). Les déchets solides sont considérés comme une riche source de polyphénols et de polysaccharides (Sabahi *et al.*, 2020).

Les polyphénols sont des composés bioactifs issus du métabolisme secondaire des plantes, présents dans diverses parties de la plante. Ils possèdent une structure chimique caractérisée par des groupes hydroxyles liés à des noyaux benzéniques, et se divisent en deux grandes familles : les flavonoïdes et les non-flavonoïdes. Ils sont importants pour leurs nombreuses activités biologiques, notamment en tant qu'antioxydants mais aussi en tant que anti-inflammatoires, anti-âge, cytotoxiques, antitumoraux, antidépresseurs, et pour leur capacité à réduire les lipides sanguins et la glycémie chez l'homme, à protéger contre le stress oxydatif, à lutter contre les microbes pathogènes, à avoir une action antidiabétique, à favoriser la sécrétion biliaire et à réduire le cholestérol. Ces propriétés en font des molécules très intéressantes pour les secteurs pharmaceutique, cosmétique, agricole et agro-industriel (de Elguea-Culebras *et al.*, 2022).

3.3. Intérêts antimicrobiens et antioxydants dans les films

Intégrés aux matériaux d'emballage, ils contribuent à prolonger la fraîcheur et la durée de vie des produits alimentaires, ils aident à prévenir l'oxydation en neutralisant les radicaux libres. Leur action antimicrobienne repose sur la destruction des membranes cellulaires bactériennes et l'inhibition des enzymes et de l'ADN, inhibant leur réplication et leur métabolisme, ce qui en fait de puissants inhibiteurs de la croissance microbienne (Ozuna *et al.*, 2024). L'emballage antimicrobien permet de limiter la croissance des agents pathogènes tels que *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas fluorescens* et *Salmonella sp* (Alkan & Yemenicioğlu, 2016).

Deuxième partie

Partie expérimentale

Chapitre 4

Matériel et méthodes

4.1. Matériel

4.1.1. Matériel végétal

La plante utilisée dans le présent travail est la chia (*Salvia hispanica* L.). La partie aérienne, représentée par les feuilles, les fleurs et les tiges, est illustrée dans la Figure 4, elle a été collectée de la région de Bordj Bou Arreridj, et a été séchée à l'ombre dans un endroit sec et à température ambiante pendant quelques jours et a été stockée dans un endroit sec avant utilisation. Tandis les graines de *Salvia hispanica* L. utilisées dans cette étude ont été acquises auprès d'un herboriste local, garantissant leur origine naturelle et leur qualité.



Figure 4. Le matériel végétal constitue des parties aériennes de *Salvia hispanica* L. Utilisées pour l'extraction.

4.2. Méthodes

4.2.1. Obtention des résidus de *Salvia hispanica* L.

Selon le protocole décrit par Righi (2021), les parties aériennes de la plante ont été hydrodistillées à l'aide d'un dispositif d'extraction de type Clevenger (Figure 5). 100 grammes de matière végétale ont été immergés dans 1500 ml d'eau distillée, contenus dans un ballon en verre, pendant 4 heures. Le distillat obtenu a été congelé jusqu'à utilisation ultérieure. La suspension résiduelle a été filtrée pour recueillir le filtrat « résidu liquide », qui a ensuite été séché dans des boîtes de Pétri, à l'étuve, à 40 °C. Le résidu liquide séché a été stocké dans des flacons opaques, à 4 °C et à l'obscurité, jusqu'à son utilisation. La matière végétale restante constitue le résidu solide.

Afin de valoriser le résidu solide issu de l'hydrodistillation de la plante et d'éviter son élimination, celui-ci a été utilisé pour la préparation d'un extrait hydroéthanolique, selon le protocole décrit par Souilah *et al.* (2021) avec quelque modification. 5 grammes de matériel végétal ont été macérés dans 100 ml de solvant hydroéthanolique à 50 % (v/v), selon un rapport de 1:20 (p/v), au lieu du rapport initial de 1:10 (p/v) avec un solvant méthanol/eau (70/30, v/v). La macération a été effectuée sous agitation continue, à température ambiante, à l'abri de la lumière, pendant 24 heures. Le mélange a été filtré puis évaporé à sec dans une étuve à une température de 40°C. Le produit est récupéré sous forme solide et conservé à 4 °C, à l'obscurité, dans des flacons opaques, jusqu'à son utilisation.

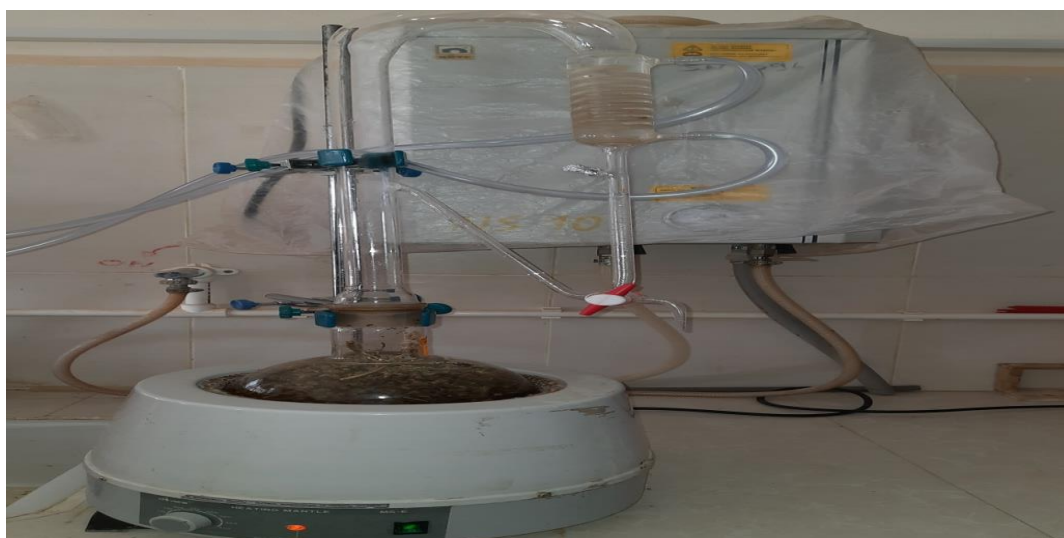


Figure 5. Dispositif d'hydrodistillation de type Clevenger.

4.2.2. Rendement d'extraction

Le rendement d'extraction est calculé par la formule donnée par (Mahmoudi *et al.*, 2013)

$$R (\%) = (M_{\text{ext}}/M_{\text{éch}}) \times 100$$

Où : R est le rendement exprimé en pourcentage %

M_{ext} est la masse de l'extrait après évaporation du solvant en mg

M_{éch} est la masse sèche de l'échantillon végétal en mg.

4.2.3. Dosage des polyphénols totaux

La teneur totale en polyphénols a été déterminée par la méthode de Folin-Ciocalteu, selon le protocole décrit par Singleton & Rossi (1965). 100 µl de l'extrait dilué ont été mélangés à 500 µl de réactif de Folin-Ciocalteu à 10 % (v/v). Après quatre minutes, 400 µl de carbonate de sodium (Na₂CO₃) à 7,5 % (p/v) ont été ajoutés, et le mélange a été incubé pendant 2 heures à l'obscurité. L'absorbance a été mesurée à 765 nm, en utilisant comme contrôle un mélange contenant 100 µl de méthanol (au lieu de l'extrait), 500 µl de réactif de Folin-Ciocalteu et 400 µl de carbonate de sodium. Une courbe d'étalonnage a été établie en utilisant l'acide gallique comme étalon, avec des concentrations allant de 1,562 à 200 µg/ml. Les résultats ont été exprimés en microgrammes d'équivalent acide gallique par milligramme d'extrait (µg EAG/mg extrait) (Deghima *et al.*, 2020).

4.2.4. Dosage des flavonoïdes totaux

La teneur totale en flavonoïdes a été déterminée par une méthode adaptée de celle décrite par (Djeridane *et al.*, 2006) basée sur la formation d'un complexe coloré entre les flavonoïdes et le trichlorure d'aluminium (AlCl₃), absorbant à 430 nm dans le spectre visible. Dans des tubes à essai, 500 µl d'une solution d'AlCl₃ à 2 % ont été ajoutés à 500 µl d'extrait et le mélange a été incubé pendant 15 minutes à l'obscurité. L'absorbance a ensuite été mesurée à 430 nm contre un blanc constitué 500 µl d'AlCl₃ et 500 µl de méthanol. Dans les mêmes conditions, une courbe d'étalonnage a été établie en utilisant la quercétine (1,562 à 100 µg/ml), et les résultats ont été exprimés en microgrammes d'équivalent quercétine par milligramme d'extrait (µg EQ/mg d'extrait) (Deghima *et al.*, 2020).

4.2.5. Test de pouvoir réducteur

Ce protocole repose sur la capacité des extraits à réduire les ions ferriques (Fe^{3+}) en ions ferreux (Fe^{2+}). L'augmentation de l'absorbance observée est directement proportionnelle au pouvoir réducteur des extraits testés (Beddou, 2015).

Le test est déterminé selon la méthode décrite par Oyaizu 1986, elle consiste à mélanger 500 μl de l'extrait, à différentes concentrations avec 500 μl de tampon phosphate (0.2 M à pH 6.6) et 500 μl d'une solution de ferricyanure de potassium ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$) à 1% (m/v)); Les tubes ont été agités et incubés à 50°C pendant 20 min dans un bain-marie. Puis, 500 μl d'acide trichloracétique (TCA) à 10% sont ajoutés pour stopper la réaction. Les tubes ont été centrifugés 10 min à 700 tours/min. 500 μl de surnageant ont été additionnés à 500 μl d'eau distillée et 500 μl de chlorure de fer (FeCl_3) à 0.1%. L'absorbance des solutions a été mesurée à 700 nm contre un blanc, où l'extrait a été remplacé par du méthanol. Une courbe d'étalonnage a été préparée en utilisant de l'acide ascorbique dans les mêmes conditions et les résultats ont été exprimés en équivalent d'acide ascorbique par mg d'extrait ($\mu\text{g EAA} / \text{mg d'extrait}$) (Deghima *et al.*, 2020).

4.2.6. Capacité antioxydante totale

La capacité antioxydante totale (TAC) des extraits a été évaluée par la méthode au phosphomolybdène, selon le protocole de Prieto *et al.* 1999. Ce test repose sur la réduction du molybdène Mo(VI), présent sous forme d'ions molybdate MoO_4^{2-} , en molybdène Mo (V) MoO^{2+} en présence de l'extrait ou d'un agent antioxydant formant un complexe verdâtre en milieu acide. Un volume de 100 μl d'extrait a été mélangé à 1 ml d'un réactif composé de (acide sulfurique 0,6 M, phosphate de sodium 28 M et molybdate d'ammonium 4 M), puis incubé à 95 °C pendant 90 minutes. L'absorbance a été mesurée à 695 nm contre un blanc contenant du méthanol à la place de l'extrait. L'acide gallique et la quercétine ont été utilisés comme standards à des fins de comparaison. L'activité antioxydante a été exprimée en microgrammes d'équivalent acide ascorbique par milligramme d'extrait ($\mu\text{g EAA}/\text{mg extrait}$) (Deghima *et al.*, 2020).

4.2.7. Test de piégeage du radical DPPH

Dans cet essai, les antioxydants réduisent la solution alcoolique de DPPH violet, ce qui entraîne une coloration jaune. Le potentiel antioxydant reflète la quantité de radical DPPH réduite par les antioxydants dans l'échantillon (Ulewicz-Magulska & Wesolowski, 2023).

Un mélange de 0,5 ml de solution méthanolique de DPPH à 0,1 mM et de 1,5 ml d'extraits d'échantillons a été incubé à l'obscurité pendant 30 minutes, et l'absorbance a été mesurée à 517 nm. L'acide gallique et la quercétine, en tant que standards, ont été utilisés pour comparaison. Le pourcentage d'inhibition des radicaux DPPH a été déterminé à l'aide de la formule suivante : % d'inhibition DPPH = $(Ac - At / Ac) * 100$ (Deghima *et al.*, 2020).

Où Ac est l'absorbance du témoin (sans extrait) et At celle de l'échantillon testé. Les pourcentages d'inhibition obtenus ont été représentés graphiquement en fonction des concentrations des extraits.

4.3. Extraction du mucilage des graines de *Salvia hispanica* L.

L'extraction du mucilage des graines de chia a été réalisée en suivant la méthode décrite par Muñoz *et al.* (2012), avec une légère modification. Dans un bécher de 1 litre, 800 ml d'eau distillée ont été placés, respectant une proportion graines: eau de 1:40. Le bécher a été installé sur une plaque chauffante, et la température a été surveillée jusqu'à atteindre 80 °C moment auquel 20 g de graines de chia ont été ajoutées et le mélange a été agité pendant 30 minutes, au lieu des 2 heures à température ambiante initialement préconisées (Muñoz *et al.*, 2012).

Le mucilage obtenu a été séché dans une étuve à 45 °C jusqu'à formation d'une couche solide sèche, puis conservé dans un flacon à une température de +4 °C jusqu'à son utilisation.

4.4. Préparation de biofilm

Trois formulations de biofilm ont été élaborées à partir de mucilage de chia lyophilisé, ils se distinguent par la nature du liquide utilisé « solvant » et l'ajout ou non de résidus d'extraits. Les biofilms ont été préparés selon le protocole (Muñoz-Tebar *et al.*, 2021) avec quelques modifications.

Biofilm 1 : Mucilage de chia + hydrolat + résidu liquide/solide

Dissolution du mucilage : Sous agitation et à une température ne dépassant pas 60 °C, 1 gramme de mucilage est dissous dans un volume déterminé d'hydrolat.

Enrichissement en composés bioactifs: une fois le mucilage dissous, 1 gramme d'extrait liquide/solide est ajouté afin d'incorporer des composés bioactifs, puis le mélange est homogénéisé soigneusement.

Ajout de glycérol : Une fois le mélange est bien dissous, 2 grammes de glycérol sont incorporés afin d'améliorer la flexibilité du biofilm.

Ajout de Tween 20 : Ajouter 1 gramme de Tween 20 au mélange comme agent tensioactif.

Ajout de l'acide acétique 1% : régulateur de pH et antimicrobien.

Ajustement du volume : Compléter le volume total à 100 ml par l'hydrolat.

Homogénéisation : Agiter l'ensemble jusqu'à obtention d'une solution parfaitement homogène.

Biofilm 2 : Mucilage de chia + hydrolat

Suivre les mêmes étapes que ci-dessus, à l'exception de l'étape d'enrichissement en composés bioactifs : Aucun résidu liquide ou solide n'est ajouté dans cette formulation.

Biofilm 3 : Mucilage de chia + eau

Même protocole suivi, en remplaçant l'hydrolat par de l'eau distillée dans toutes les étapes où il est utilisé et sans l'ajout des résidus.

Verser dans des boîtes de Pétri de 6 cm de diamètre, à raison de 10 ml par boîte, puis laisser sécher à 50 °C dans une étuve jusqu'à dessiccation complète pour tester les caractéristiques de biofilm « élasticité, couleur... ».

La même procédure est répétée en modifiant uniquement la concentration de résidu, portée cette fois à 4% (4g pour 100 ml).

4.5. Application de la solution filmogène en tant que bio-emballage.

4.5.1. Enrobages des bananes et des tomates

Afin d'évaluer l'efficacité des sous-produits issus de l'hydrodistillation de *Salvia hispanica* L., trois méthodes de préparation de biofilms ont été testées. Chaque méthode utilise une combinaison spécifique d'ingrédients pour former un enrobage, appliqué sur des bananes et tomates fraîches de même calibre, sans détérioration ni blessure, achetées sur le marché local.

Les fruits ont été trempés dans les différentes solutions filmogènes, à raison de trois bananes par solution pour tester l'activité antioxydante de biofilm renforcé par les sous-produits de chia, et de deux tomates par solution pour évaluer l'activité antifongique. L'excès d'enrobage

a été égoutté, puis les fruits enrobés ont été laissés à sécher à température ambiante. Le témoin était constitué des fruits non enrobés.

Les formulations des biofilms sont les suivantes :

1/ Mucilage + Résidu + Hydrolat « M+R ».

2/ Mucilage + Hydrolat « M+H ».

3/ Mucilage + Eau « M+E ».

4/ Témoin (sans enrobage) « T ».

4.5.2. Analyse sensorielle des bananes enrobées

L'effet des films préparés sur la conservation des fruits a été étudié en utilisant la banane et la tomate comme fruit modèle. Leur apparence a été régulièrement évaluée pendant 10 jours pour la banane à température et atmosphère ambiante, et 17 jours pour la tomate au réfrigérateur (+4 °C), en se basant sur des critères tels que l'aspect visuel, la texture, la couleur, la brillance et l'acceptabilité.

Chapitre 5

Résultats et discussion

5.1. Rendement de résidu liquides et hydro-éthanolique

Le rendement d'extraction de la partie aérienne de *Salvia hispanica L.* a été calculé selon la méthode de Mahmoudi *et al.* (2013) à l'aide de la formule suivante :

$R (\%) = (M_{\text{ext}}/M_{\text{éch}}) \times 100$. Les résultats sont présentés dans la Figure 06.

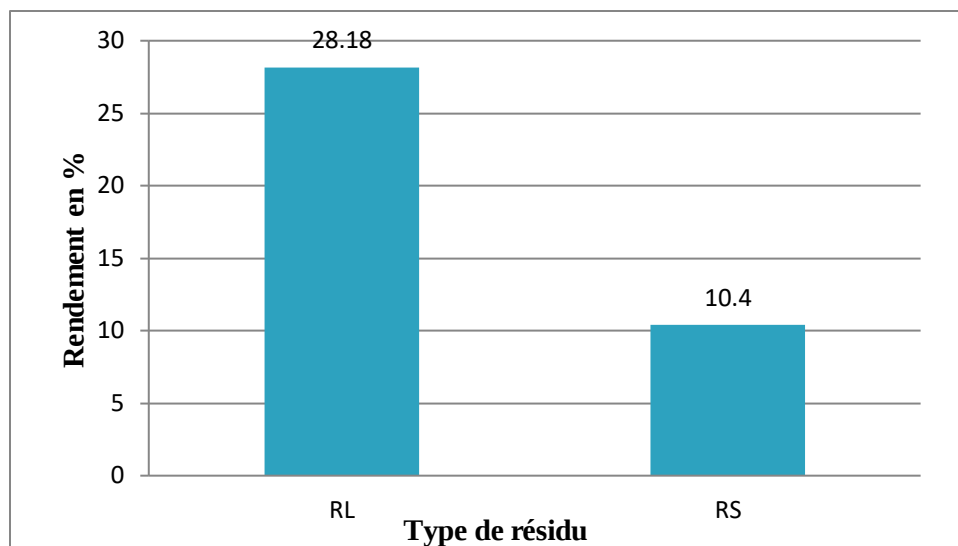


Figure 6. Histogramme représentant le rendement des résidus de l'hydrodistillation de la partie aérienne de *Salvia hispanica L.*
RL : résidu liquide ; RS : résidu solide (hydro-éthanolique)

Le résidu liquide a présenté le rendement le plus élevé, avec 28 %, tandis que celui de l'extrait hydro-éthanolique s'est révélé plus faible, estimé à 10 %.

5.2. Dosage des polyphénols totaux

Dans la présente étude, la teneur en polyphénols totaux a été évaluée dans deux sous-produits issus de l'hydrodistillation de *Salvia hispanica L.* résidus «solides et liquides».

La teneur en polyphénols a été déterminée à partir d'une courbe d'étalonnage élaborée avec différentes concentrations de 1.562 à 200 µg/ml d'une solution d'acide gallique. Les résultats de l'étalon obtenus sont présentés dans la Figure 07.

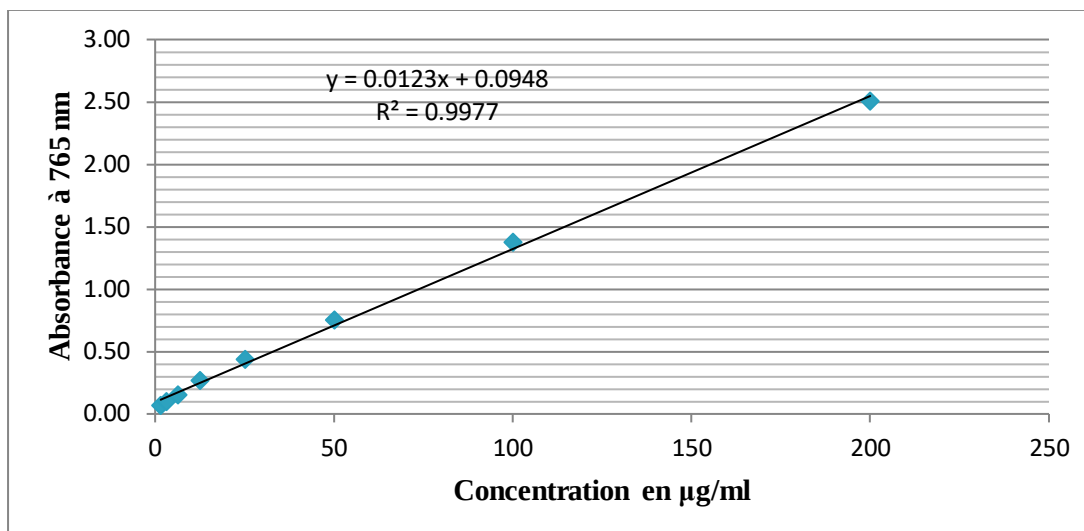


Figure 7. Droite d'étalonnage de l'acide gallique pour le dosage des polyphénols totaux.

La quantité des polyphénols totaux dans les extraits est exprimée en microgramme équivalent d'acide gallique par milligramme d'extrait ($\mu\text{g EAG/mg d'extraits}$). Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 08.

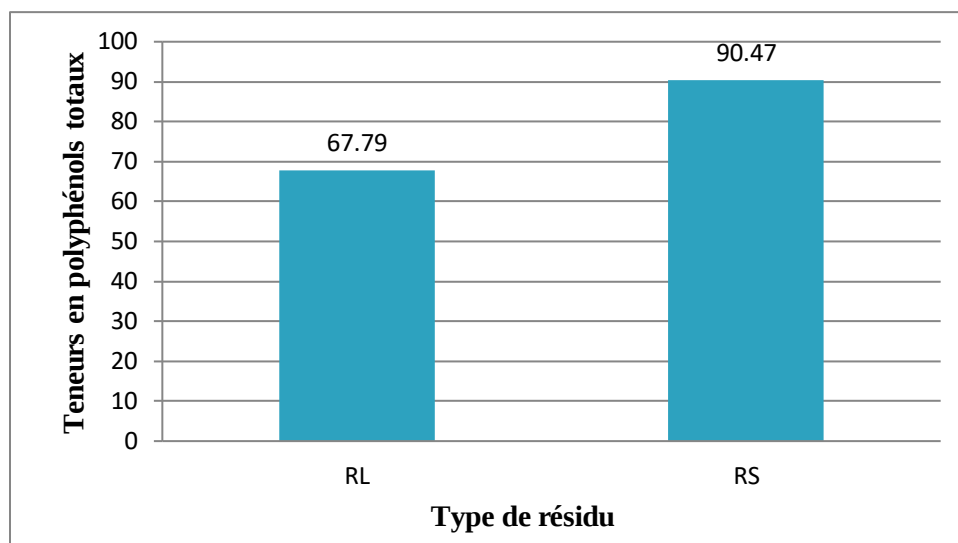


Figure 8. Histogramme représentant la teneur des polyphénols des résidus de l'hydrodistillation de la partie aérienne de *Salvia hispanica L.* exprimé en $\mu\text{g EAG}$ par mg d'extraits .
RL : résidu liquide (extrait aqueux) ; RS : résidu solide (extrait hydro-éthanolique)

La teneur en polyphénols totaux des sous-produits de l'hydrodistillation de *Salvia hispanica L.* a été estimée à $90 \mu\text{g EAG}$ par mg d'extraits pour le résidu solide et à $67 \mu\text{g EAG}$

par mg d'extrait pour le résidu liquide. Ces résultats révèlent une concentration appréciable en composés phénoliques, témoignant du potentiel antioxydant de cette espèce.

Selon Tosun *et al.* (2009), les extraits méthanoliques d'espèces du genre *Salvia* présentent des concentrations variables en composés phénoliques totaux. La teneur la plus élevée a été observée chez *Salvia verticillata* (167 µg EAG/mg de matière sèche), suivie par *Salvia virgata* (101 µg EAG/mg MS) et *Salvia candidissima* (100 µg EAG/mg MS). En revanche, *Salvia microstegia* présentait la teneur la plus faible, avec 50 µg EAG/mg MS. Selon les données recueillies dans la littérature, la teneur en polyphénols totaux chez les espèces du genre *Salvia* varie généralement entre 41 et 134 µg EAG/mg de matière sèche. Ces résultats confirment et s'alignent globalement avec les tendances rapportées dans les études précédentes.

La teneur en polyphénols du résidu solide de *Salvia hispanica L* se situe dans la moyenne haute des valeurs rapportées dans la littérature pour les espèces du même genre. Elle est comparable à celle de *Salvia virgata* et *S. candidissima*, mais inférieure à *S. verticillata* (167 µg EAG/mg de MS), qui montre la concentration la plus élevée. En revanche, cette teneur est nettement supérieure à celle de *S. microstegia* (50 µg EAG/mg de MS), espèce identifiée comme la moins riche en polyphénols. La teneur en polyphénols de résidu liquide issu de l'hydrodistillation (67 mg EAG/g de MS) est également dans la gamme rapportée, bien qu'elle soit inférieure à celle obtenue par la macération éthanol-eau du résidu solide. Selon (Bourgou *et al.*, 2016) la méthode d'extraction influence considérablement le rendement et les teneurs en composés phénolique, ainsi que l'utilisation de solvants mixtes aboutit à un fort enrichissement des extraits en polyphénols. La supériorité des solvants mixtes seraient dues à l'augmentation de la solubilité des composés phénoliques dans les extraits obtenus par des solvants mixtes comparés à ceux obtenus par des solvants purs.

Selon Dziadek *et al.* (2022), *Salvia hispanica* et *Salvia officinalis* présentent des teneurs en polyphénols totaux comparables à celle du résidu solide de *Salvia hispanica* obtenu dans notre étude, avec respectivement 97µg EAG/mg MS et 94µg EAG/mg de matière sèche, contre 90 µg EAG/mg de matière sèche pour notre résidu solide. De plus, Ces résultats sont nettement supérieurs à celle du résidu liquide, estimée à 67,79 mg EAG/g de matière sèche.

Salvia hispanica L soit plus connue pour ses graines riches en acides gras oméga-3 (Dziadek *et al.*, 2022), ses sous-produits issus de la distillation possèdent également une valeur

antioxydante significative, comparable à certaines espèces médicinales plus étudiées du genre *Salvia*.

5.3. Dosage des flavonoïdes totaux

Une courbe d'étalonnage de quercétine (1,562 à 100 µg/ml) est utilisée pour la quantification des flavonoïdes totaux dans les deux résidus (Figure 09).

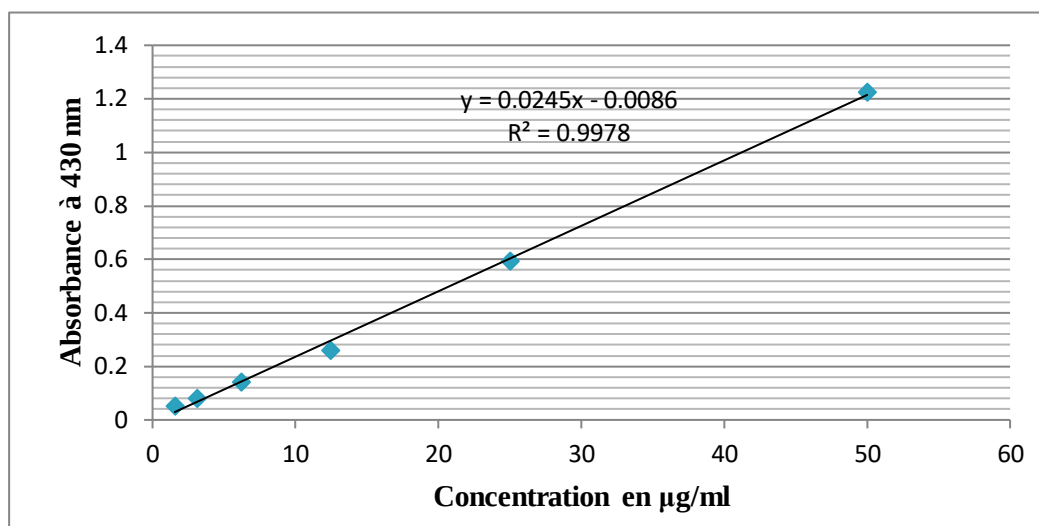


Figure 9. Droite d'étalonnage de quercétine pour le dosage des flavonoïdes totaux.

La teneur en flavonoïdes a été exprimée en microgrammes d'équivalent quercétine par milligramme d'extrait (µg EQ/mg d'extrait). Comme représenté dans la Figure 10.

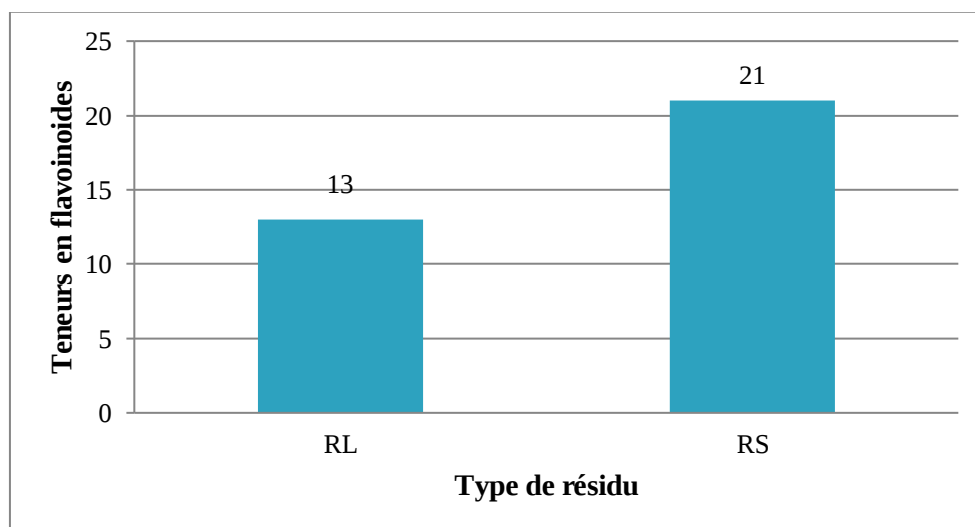


Figure 10. Histogramme représentant la teneur en flavonoïdes des résidus de la partie aérienne de *Salvia hispanica* L. exprimé en µg équivalent de quercétine/mg d'extrait.

RL : résidu liquide ; RS : résidu solide (hydro-éthanolique)

Les résultats de notre étude ont mis en évidence la présence de flavonoïdes dans les deux extraits testés. Le résidu solide présente une teneur en flavonoïdes totaux de l'ordre de 21 µg EQ/mg d'extrait, suivi du résidu liquide avec une valeur estimée à 13 µg EQ/mg d'extrait.

L'étude d'Alimpić *et al.* (2014) révèle différentes concentrations de flavonoïdes dans les divers extraits obtenus par macération de *Salvia amplexicaulis* Lam., en fonction du solvant utilisé et de la partie de la plante considérée. L'extrait éthanolique des feuilles présente la teneur la plus élevée, avec 49 µg EQ/mg, tandis que l'extrait éthanolique de la plante entière en contient moins 27 µg EQ/mg. Concernant les extraits méthanoliques, les feuilles affichent une concentration de 33 µg EQ/mg, inférieure à celle observée dans l'extrait de la plante entière, qui atteint 38 µg EQ/mg.

Selon Et-Touys *et al.* (2016), l'extrait à l'hexane des feuilles de *Salvia officinalis* L. obtenu par macération présente la teneur en flavonoïdes la plus élevée, avec 33 ± 1.02 µg EQ/mg suivi de l'extrait méthanolique avec 31 ± 0.62 µg EQ/mg et, en dernier, de l'extrait éthanolique avec 26 ± 2.96 µg EQ/mg.

En comparaison, les résidus de *Salvia hispanica* analysés dans cette étude montrent des teneurs en flavonoïdes notablement plus faibles, avec 21 µg EQ/mg pour le résidu solide et 13 µg EQ/mg pour le résidu liquide. Les faibles teneurs en flavonoïdes observées dans chaque fraction peuvent être attribuées à la répartition des composés entre les résidus solide et liquide durant l'hydrodistillation. En effet, ce procédé entraîne une séparation partielle des métabolites, réduisant leur concentration apparente dans chaque fraction analysée individuellement. Toutefois, si l'on considère l'ensemble des deux résidus, les teneurs globales en flavonoïdes sont comparables à celles généralement rapportées dans la littérature.

Le résidu solide (21 µg EQ/mg d'extrait) obtenu par macération présente une teneur en flavonoïdes plus élevée que le résidu liquide (13 µg EQ/mg d'extrait) issu de l'hydrodistillation, ce qui est en accord avec les résultats obtenus pour les polyphénols. Ces résultats montrent que la méthode d'extraction influence significativement le rendement et les teneurs en composés phénoliques (Bourgou *et al.*, 2016). Cela suggère que le mélange éthanol-eau constitue un solvant plus efficace pour l'extraction de ces composés que l'eau issue de l'hydrodistillation.

Les différences observées dans la teneur totale en composés phénoliques entre notre étude et celles rapportées dans la littérature peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, les échantillons analysés proviennent de zones géographiques différentes, or il est bien établi que la localisation influence significativement la composition biochimique des graines de chia. Ensuite, les protocoles d'extraction des composés phénoliques varient selon les études, et il a été démontré que ces variations méthodologiques ont un impact considérable sur la teneur finale en composés phénoliques mesurée (Dib *et al.*, 2021). Ainsi que, En raison des différences dans le type d'extrait et les parties de plante utilisées (Merviç *et al.*, 2022).

5.4. Test de pouvoir réducteur

La courbe présentée à la Figure 11 utilise l'acide ascorbique comme référence afin de comparer le pouvoir réducteur de nos extraits avec celui de standards.

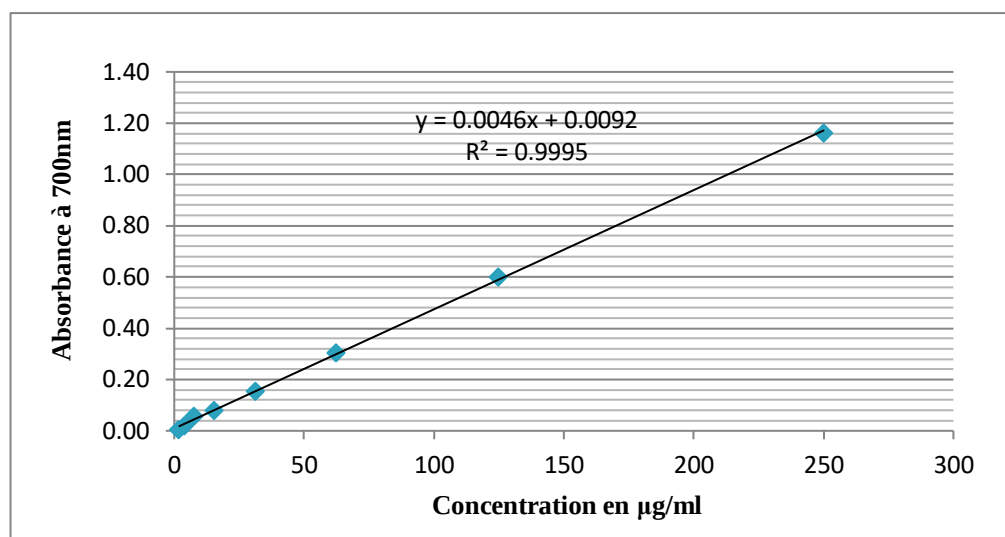


Figure 11. Droite d'étalonnage d'acide ascorbique de test pouvoir réducteur

Les résultats du test du pouvoir réducteur des résidus de *Salvia hispanica L.* et les standards sont montrés dans la Figure 12. Les valeurs obtenues sont exprimées en µg EAA/mg d'extrait.

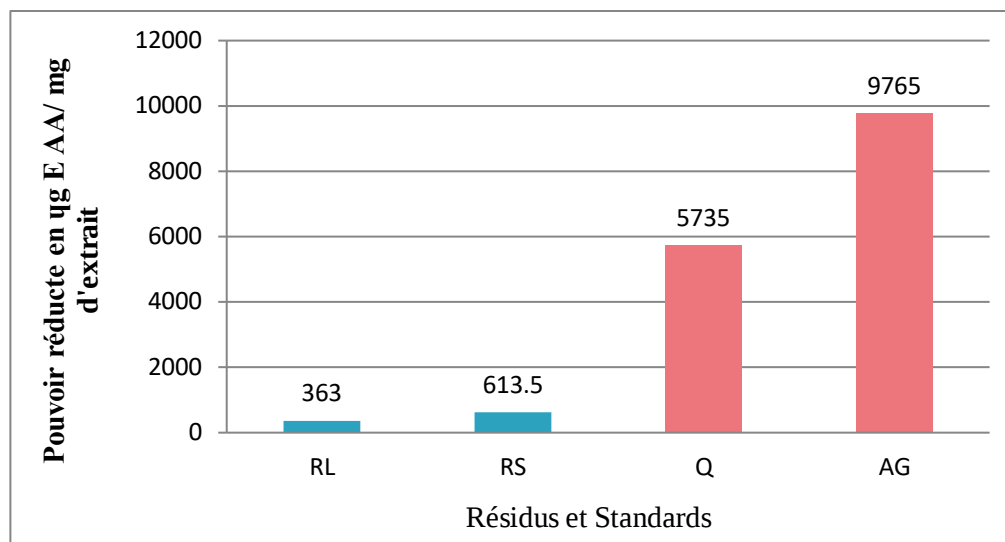


Figure 12. Résultats de la comparaison du pouvoir réducteur des résidus et des standards exprimés en μg équivalent d'acide ascorbique /mg d'extrait.

RL : résidu liquide ; RS : résidu solide ; Q : quercétine ; AG : acide gallique

Les valeurs de test pouvoir réducteur sont entre 363 à 9765 $\mu\text{g EAA/mg}$ d'extrait (Figure12). Le pouvoir réducteur des sous-produits issus de l'hydrodistillation de *Salvia hispanica L.* a été évalué à 613 $\mu\text{g EAA/mg}$ d'extrait pour le résidu solide, et à 363 $\mu\text{g EAA/mg}$ d'extrait pour le résidu liquide.

D'après les résultats, les deux résidus de *Salvia hispanica L.* présentent une capacité à réduire le fer, bien que leur activité réductrice reste inférieure à celle des standards, à savoir la quercétine (5735 $\mu\text{g EAA/mg}$ d'extrait) et l'acide gallique (9765 $\mu\text{g EAA/mg}$ d'extrait).

L'étude menée par Ververis *et al.* (2023) sur les fractions de la partie aérienne de *Salvia fruticosa* a révélé une forte activité réductrice. La fraction d'éthylacétate présentait 683 $\mu\text{g AAE/mg}$, la fraction butanolique 440 $\mu\text{g AAE/mg}$, tandis que la fraction aqueuse présentait la faible valeur estimée à 205 $\mu\text{g AAE/mg}$.

Ces résultats montrent que le résidu solide de l'hydrodistillation présente une activité comparable à celle de la fraction d'éthylacétate, qui est généralement considérée comme la plus riche en composés phénoliques. De même, le résidu liquide affiche une activité supérieure à celle de la fraction aqueuse de *S. fruticosa* (363 vs. 205 $\mu\text{g EAA/mg}$), et se rapproche de la fraction butanolique.

Mahdi *et al.* (2021) ont montré que tous les échantillons de *Salvia officinalis* possédaient la capacité à réduire le fer. Cependant, leur activité réductrice est restée inférieure à celle de l'acide ascorbique ($CE_{50} = 208 \mu\text{g/ml}$). La fraction d'acétate d'éthyle a révélé l'activité réductrice la plus efficace ($CE_{50} = 250 \mu\text{g/ml}$) comparée à celle de l'extrait hydro-méthanolique ($CE_{50} = 357 \mu\text{g/ml}$) et de la fraction de n-butanol ($CE_{50} = 312 \mu\text{g/ml}$).

Dans notre étude, l'acide ascorbique, utilisé comme standard, a présenté une CE_{50} de $62 \mu\text{g/ml}$, indiquant une activité très élevée. Le résidu solide a montré une CE_{50} estimée proche de $125 \mu\text{g/ml}$, ce qui révèle une forte capacité réductrice, supérieure à celle de l'acide ascorbique utilisé par Mahdi et al. ($208 \mu\text{g/ml}$), et nettement plus efficace que toutes les fractions de *S. officinalis*, y compris celle à l'acétate d'éthyle ($250 \mu\text{g/ml}$).

De son côté, le résidu liquide de *S. hispanica*, avec une CE_{50} proche de $250 \mu\text{g/ml}$, affiche une activité comparable à la meilleure fraction de *S. officinalis* (acétate d'éthyle), mais inférieure à celle du résidu solide. Ces résultats confirment le potentiel antioxydant prometteur des résidus d'hydrodistillation de *Salvia hispanica* L., notamment du résidu solide, qui pourrait être valorisé dans la formulation de biofilms actifs pour l'emballage alimentaire.

5.5. Capacité antioxydante total (TAC)

Les résultats sont exprimés en microgramme équivalent d'acide ascorbique par milligramme d'extrait ($\mu\text{g EAA/ mg d'extrait}$). Ils sont calculés en utilisant la courbe d'étalonnage de l'acide ascorbique représentés dans la Figure 13.

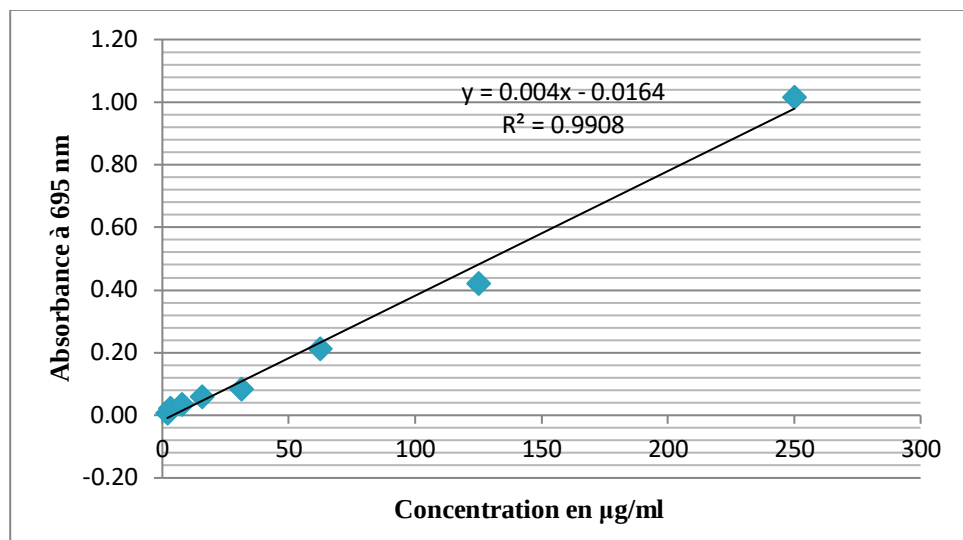


Figure13. Droit d'étalonnage d'acide ascorbique de la TAC.

Les résultats obtenus de l'activité antioxydante totale des extraits de *Salvia hispanica L.* et les standards sont présentés dans la Figure 14.

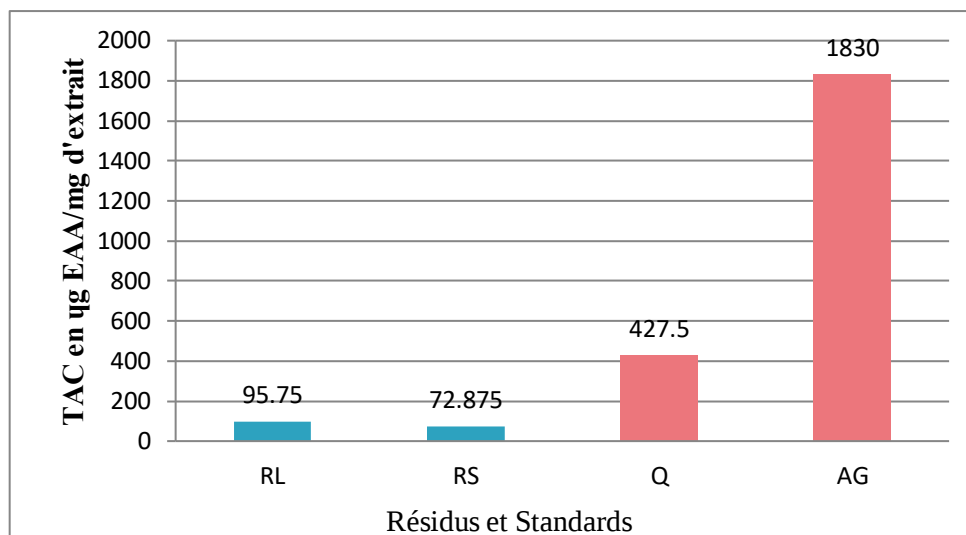


Figure 14. Résultats de la comparaison de TAC des résidus et des standards exprimés en µg équivalent d'acide ascorbique /mg d'extrait.

RL : résidu liquide ; RS : résidu solide ; Q : quercétine ; AG : acide gallique

La capacité antioxydante totale des résidus de *Salvia hispanica L.* a été estimée à 72 µg EAA/mg pour le résidu solide et 95 µg EAA/mg pour le résidu liquide. Le standard acide gallique possède une meilleur TAC 1830 µg EAA /mg que le quercétine avec 427 µg EAA /mg.

Ces valeurs sont relativement élevées en comparaison avec celles rapportées pour *Thymus algeriensis*, une espèce appartenant à la même famille botanique que *Salvia*, dont la capacité antioxydante totale a été évaluée à $26 \pm 3,5$ µg EAA/mg selon Righi (2021).

L'étude de Mahdi *et al.* (2021), portant sur les extraits de *Salvia officinalis*, a mis en évidence une capacité antioxydante totale particulièrement élevée pour la fraction d'acétate d'éthyle, avec une valeur de $817 \pm 0,06$ µg EAA/mg d'extrait. À l'inverse, l'extrait hydrométhanolique présentait une activité plus modeste, atteignant $238 \pm 0,01$ µg EAA/mg. En comparaison, dans notre étude, les capacités antioxydantes totales des résidus de *Salvia hispanica* L. issus de l'hydrodistillation se sont révélées inférieures, avec 72 µg EAA/mg pour le résidu solide et 95 µg EAA/mg pour le résidu liquide.

Cette comparaison suggère que, malgré l'éventuelle perte de composés volatils pendant l'hydrodistillation, les résidus (solide et liquide) conservent une part importante des composés antioxydants, répartis entre les deux phases. Ainsi, leur valorisation représente un intérêt certain dans une démarche de récupération des sous-produits riches en bioactif.

Il est extrêmement important de souligner qu'il existe une corrélation positive entre l'activité antioxydante et la teneur totale en composés phénoliques des extraits. Les phénols sont des constituants végétaux très importants en raison de leur capacité à piéger les radicaux libres grâce à leurs groupes hydroxyles. Par conséquent, la teneur en composés phénoliques des plantes peut contribuer directement à leur action antioxydante (Tosun *et al.*, 2009).

5.6. Test de piégeage du radical DPPH

Les résultats d'activité antioxydante sont exprimés en pourcentage d'inhibition %.

Pour la concentration 500 µg/ml, le résidu solide de notre espèce *Salvia hispanica* L. montre une activité antioxydante très élevée estimée à 94% d'inhibition et légèrement supérieure à celle du résidu liquide estimée à 93 %.

Selon Abdullah (2015), à la même concentration, les extraits méthanoliques de *Salvia virgata* et *Salvia officinalis* présentent les activités antioxydantes les plus élevées, avec respectivement 94 % et 91 % d'inhibition du radical DPPH, suivis de *Salvia sclarea* 72 % et *Salvia nemorosa* 53 %. En comparaison, le résidu solide issu de l'hydrodistillation de *Salvia hispanica* L. affiche une activité antioxydante équivalente à celle de *S. virgata*, avec une

inhibition de 94 %, tandis que le résidu liquide atteint 93 %, une valeur très proche de celle de *S. officinalis*.

Ces résultats montrent que les résidus post-hydrodistillation de *Salvia hispanica L* possèdent une activité antioxydante comparable, voire équivalente, à celle des extraits méthanoliques de certaines espèces reconnues pour leur fort potentiel antioxydant comme *S. officinalis*.

L'activité antioxydante des résidus a été évaluée par leur capacité à piéger le radical libre DPPH, exprimée par la concentration inhibitrice médiane (IC₅₀). Les résultats obtenus montrent que les résidus d'hydrodistillation de *Salvia hispanica L* présentent une forte activité antioxydante, avec une IC₅₀ d'environ 3,5 µg/ml pour le résidu solide comme pour le résidu liquide. Ces valeurs sont nettement inférieures à celles rapportées pour plusieurs espèces du genre *Salvia*, ce qui indique une capacité antioxydante supérieure. Par exemple, selon (Zeid *et al.*, 2022), la fraction à l'acétate d'éthyle des parties aériennes de *Salvia hispanica L* a montré une IC₅₀ de 13,11 µg/ml, ce qui reste près de 4 fois moins puissant que nos extraits résiduels.

De plus, d'après Alimpic *et al.* (2014), l'extrait éthanolique des feuilles de *Salvia amplexicaulis Lam* a affiché une IC₅₀ de 16 µg/ml, suivi par l'extrait de la plante entière (28 µg/ml). Concernant les extraits méthanoliques, celui de la plante entière s'est révélé le plus actif (21 µg/ml), suivi de près par celui des feuilles (23 µg/ml). Cela positionne nos extraits de *S. hispanica L* comme nettement plus efficaces en termes de pouvoir réducteur.

Ces résultats démontrent que les résidus d'hydrodistillation de *Salvia hispanica L* peuvent constituer une source particulièrement riche en composés antioxydants, surpassant largement d'autres espèces du genre *Salvia* en termes de pouvoir de piégeage du radical DPPH. Ils pourraient donc être valorisés dans des applications alimentaires ou pharmaceutiques comme agents antioxydants naturels puissants.

Cette variation peut probablement s'expliquer par les concentrations en composés phénoliques et flavonoïdes présentes dans nos extraits, lesquelles sont étroitement liées à l'activité anti radicalaire. En effet, la teneur en ces composés est susceptible d'être influencée par divers facteurs écologiques extrinsèques, tels que l'humidité du sol, les conditions de sécheresse, les caractéristiques génétiques, ainsi que par le stade phénologique de la plante et la durée de conservation (Et-Touys *et al.*, 2016).

5.7. Extraction du mucilage

Les résultats d'extraction du mucilage de *Salvia hispanica* L. sont montrés dans la Figure 15.



Figure 15. Mucilage de *Salvia hispanica* L. avant séchage (à gauche) et après séchage (à droite)

5.8. Apparence de biofilm

Le biofilm obtenu dans le cadre de notre étude, présenté aux Figures 16 et 17, se caractérise par une surface homogène et lisse, une structure uniforme, ainsi qu'une bonne élasticité. Il se détache facilement du moule et présente une couleur transparente, dont l'intensité varie en fonction de la concentration d'extrait utilisée.



Figure 16. Apparence du biofilm sans extrait.

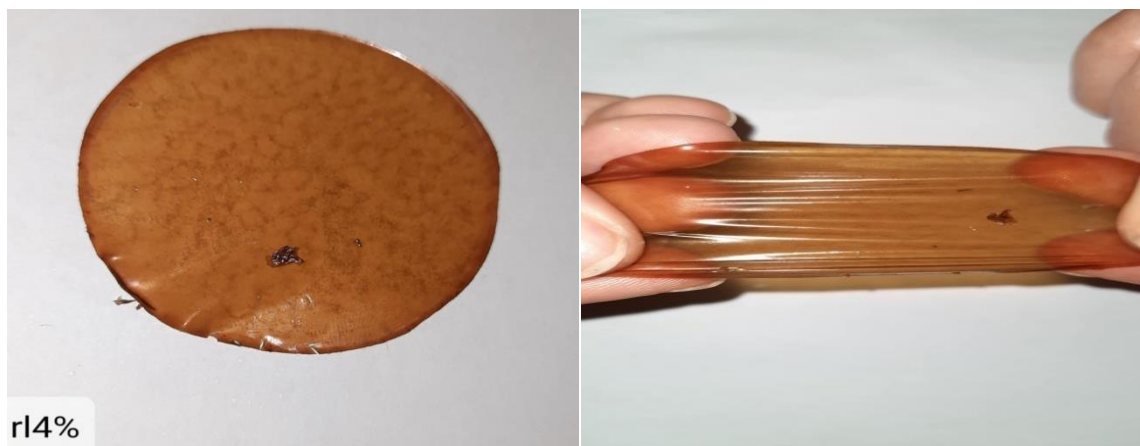


Figure 17. Apparence du biofilm fortifié avec extrait 4%.

La surface lisse et homogène du film, dépourvue de fissures ou de fractures, témoigne d'une excellente compatibilité entre les composants ainsi que d'une bonne capacité de formation de film. Cette propriété résulte de l'interaction entre le mucilage de chia, l'extrait, le Tween 20 et le plastifiant lors de la gélatinisation, comme l'ont également démontré les résultats de Lindi *et al.* (2024) en utilisant le mucilage de graines de fenugrec. Ainsi que l'étude menée par Muñoz *et al.* (2012) a montré que le mucilage de chia, en combinaison avec le concentré de protéines de lactosérum, a été utilisé avec succès pour produire des films comestibles. De plus, l'étude de Dick *et al.* (2015) a démontré que des films comestibles à base de mucilage de chia, plastifiés au glycérol, peuvent être élaborés avec succès, ces films présentent une solubilité élevée dans l'eau, une bonne résistance thermique, une transparence satisfaisante, ainsi que des propriétés barrières efficaces contre les rayons UV, offrant ainsi une protection potentiellement accrue aux aliments emballés.

5.9. Application de la solution filmogène en tant que bio-emballage.

5.9.1. Effet du biofilm sur la durée de conservation des fruits

Les échantillons traités avec le M+R et M+H ont présenté une meilleure couleur et un meilleur aspect, ainsi qu'une perte en eau négligeable (Figure 18 et 19). En revanche, les traitements M+E et T ont montré une coloration plus foncée et une perte d'humidité plus importante à la fin de l'étude. L'application du biofilm s'est révélée efficace pour réduire le contact du fruit avec l'oxygène de l'air, retarder le brunissement enzymatique, former une barrière contre la perte d'eau, limiter l'exsudation et garantir une meilleure qualité des fruits sur

une période prolongée. Ces résultats sont comparables à ceux de Thod filho *et al.* (2022) qui ont testé des biofilms à base d'amidon et de gélatine sur des bananes.

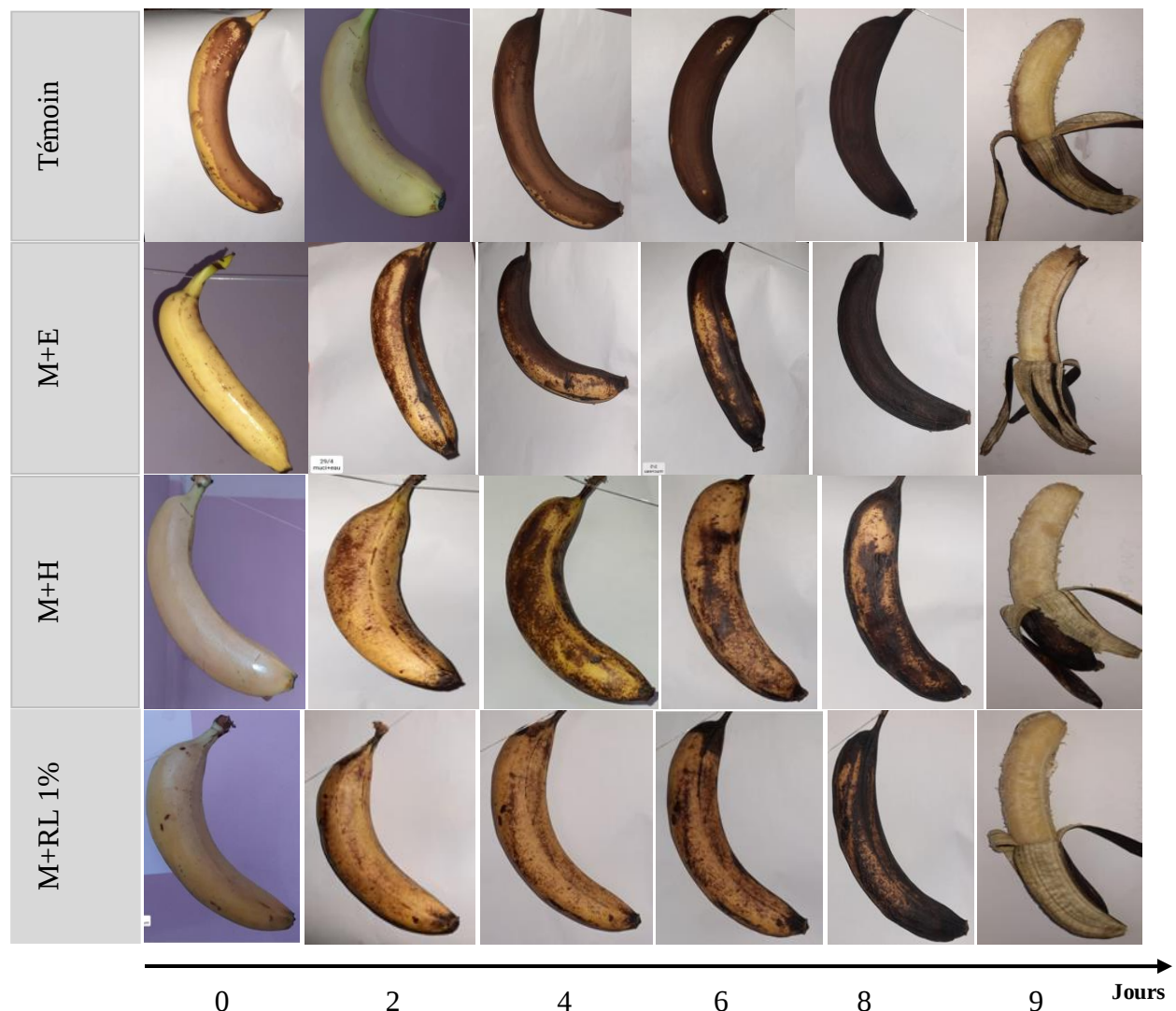


Figure 18. Aspect des fruits enrobés « RL 1% » et non enrobés en fonction de la durée de stockage.

T : témoin ; M+E: mucilage + eau ; M+H: mucilage + hydrolat ; M+R: mucilage + résidu liquide

Il apparaît que la banane témoin, ainsi que celle traitée avec la solution de M+E, présentent un brunissement plus marqué, un rétrécissement et l'apparition de rides en surface, comparativement à celles enrobées avec des films enrichis en extrait de *Salvia hispanica* L. et en hydrolat. Ces dernières, après épluchage, apparaissent mûres et intactes, sans signes de détérioration comme le montrent les Figures 18 et 19. L'hydrolat, tel qu'observé dans les Figures

18 et 19, a également présenté un effet bénéfique comparable à celui des résidus liquide et solide. Cet effet est particulièrement visible au jour 6, où la banane traitée présente un brunissement significativement réduit comparé au témoin, dont la surface est presque entièrement couverte de taches brunes. Ce résultat pourrait s'expliquer par la présence de traces d'huiles essentielles résiduelles, contribuant à la protection et à la conservation des fruits.

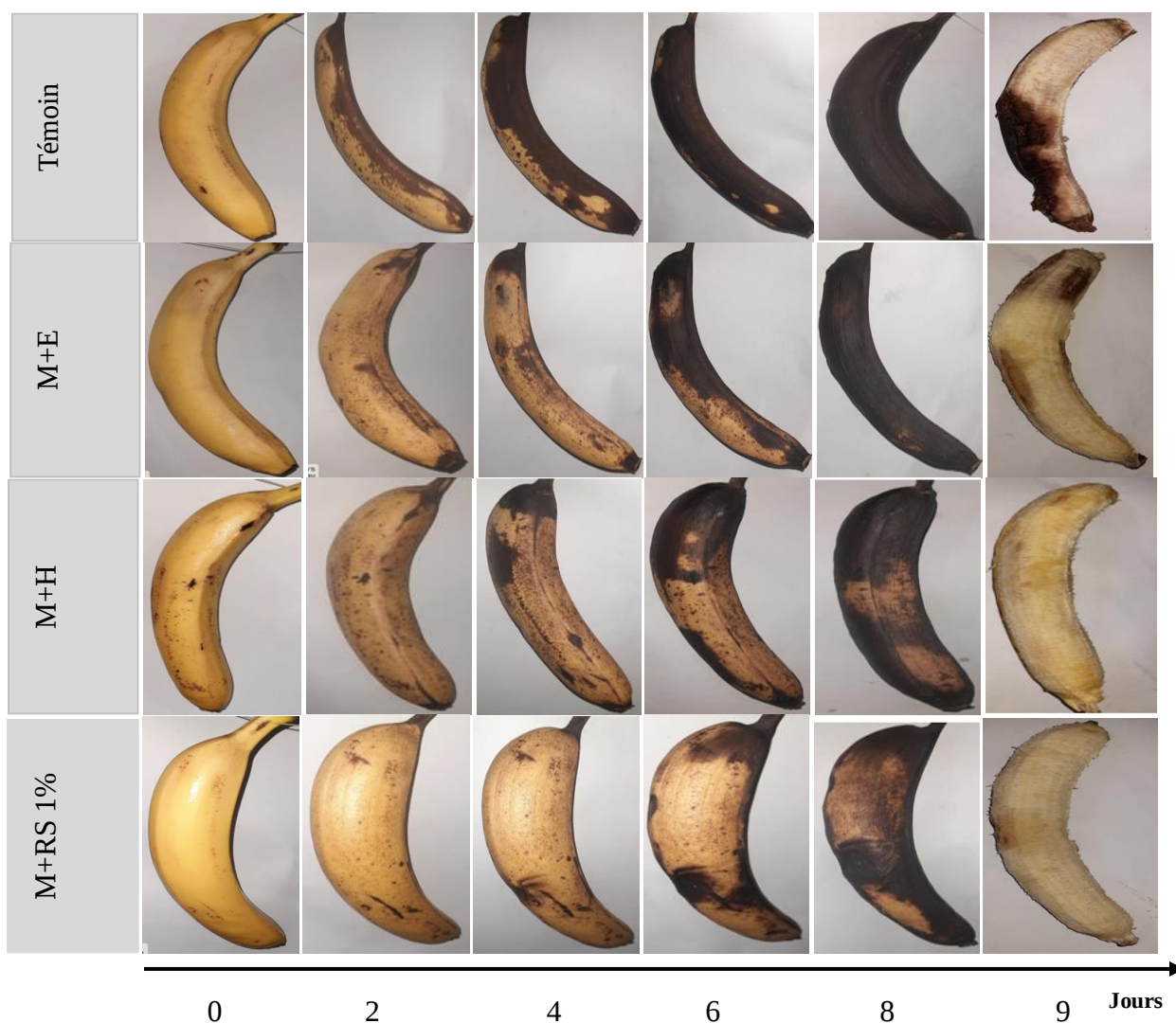


Figure 19. Aspect des fruits enrobés« RS 1% » et non enrobés en fonction de la durée de stockage.

T : témoin ; M+E: mucilage + eau ; M+H: mucilage + hydrolat ; M+R: mucilage + résidu liquide

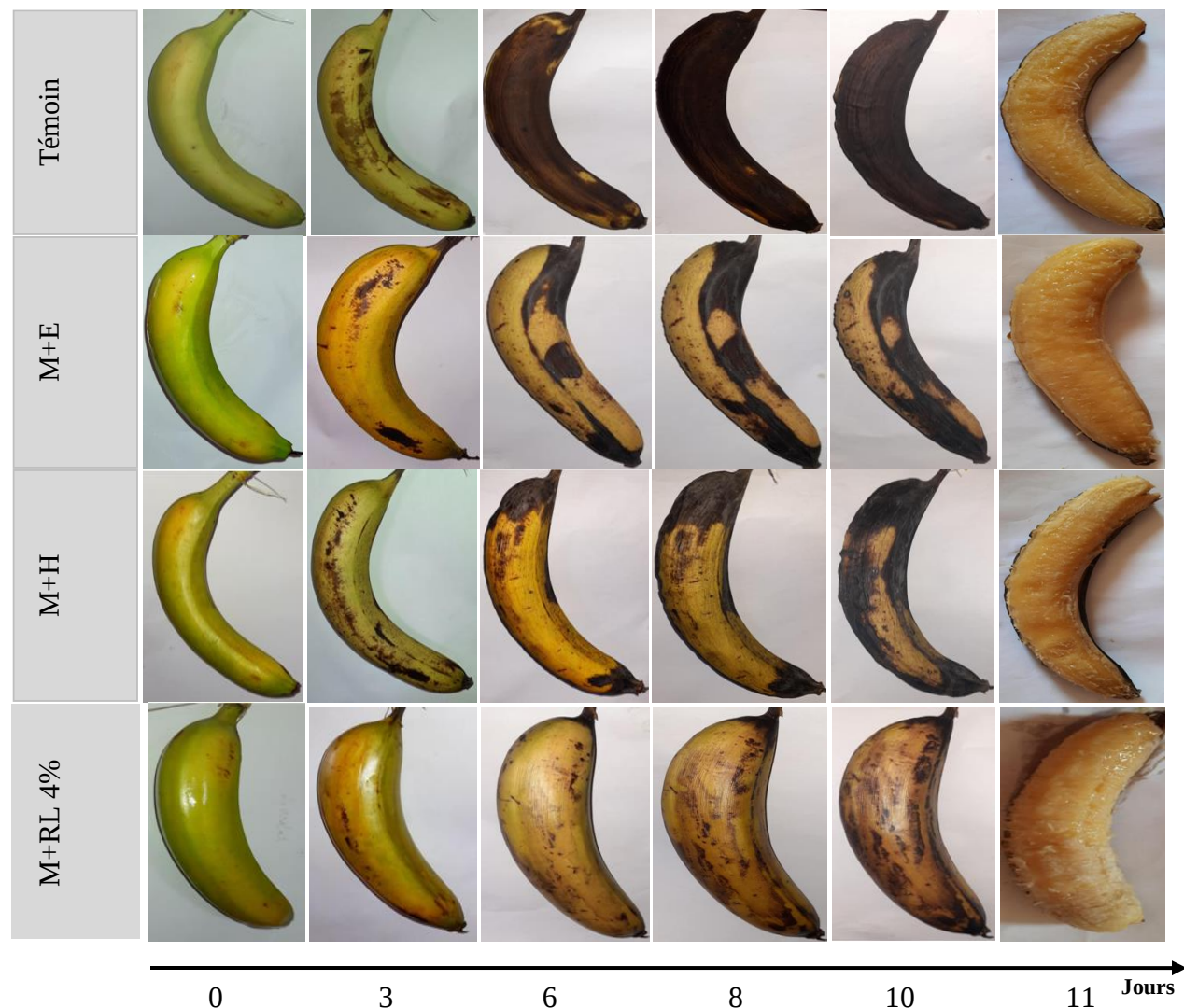


Figure 20. Aspect des fruits enrobés« RL 4% » et non enrobés en fonction de la durée de stockage.

T : témoin ; M+E: mucilage + eau ; M+H: mucilage + hydrolat ; M+R: mucilage + résidu liquide

La concentration de 4 % de résidu liquide a montré un effet plus marqué que celle de 1 %, ce qui se traduit par un meilleur aspect visuel et une coloration moins altérée des bananes. La banane au dixième jour présente un aspect meilleur que celui observé au sixième et huitième jours pour la banane traitée avec la concentration 1%. Cette observation suggère que l'augmentation de la concentration du traitement renforce son efficacité, notamment en retardant le brunissement et en maintenant une meilleure qualité visuelle du fruit. Cela pourrait être attribué à une présence plus élevée de composés actifs, jouant un rôle protecteur plus marqué contre l'oxydation et la perte d'humidité.

Au cours de la maturation, la couleur de la peau de la banane passe du vert au brun, puis au brun foncé, comme celle représentée à la Figure 20, en raison d'une série de réactions enzymatiques. Au début de cette période, la chlorophylle

est progressivement transformée en xanthophylle par l'enzyme chlorophyllase. L'activité de cette enzyme provoque le jaunissement de la peau de la banane. Aux stades avancés de la maturation et en présence d'oxygène, une autre enzyme, la polyphénol oxydase « PPO », favorise l'oxydation des phénols en quinones, dont la polymérisation en macromolécules est ensuite responsable de la pigmentation brune (Iacovino *et al.*, 2024).

Le biofilm à base de chia forme une barrière semi-perméable qui réduit le contact avec l'oxygène (moins d'oxydation), diminue la perte d'eau et ralentit la maturation, contient des antioxydants naturels (présents dans l'extrait aérien) qui inhibent la PPO. Nos résultats indiquent que les résidus solides et liquides de *Salvia hispanica L.* ont montré une capacité de piégeage du radical DPPH d'environ 3,5 µg/ml, ce qui suggère une activité antioxydante modérée. Cette activité pourrait être bénéfique pour retarder le brunissement des bananes.

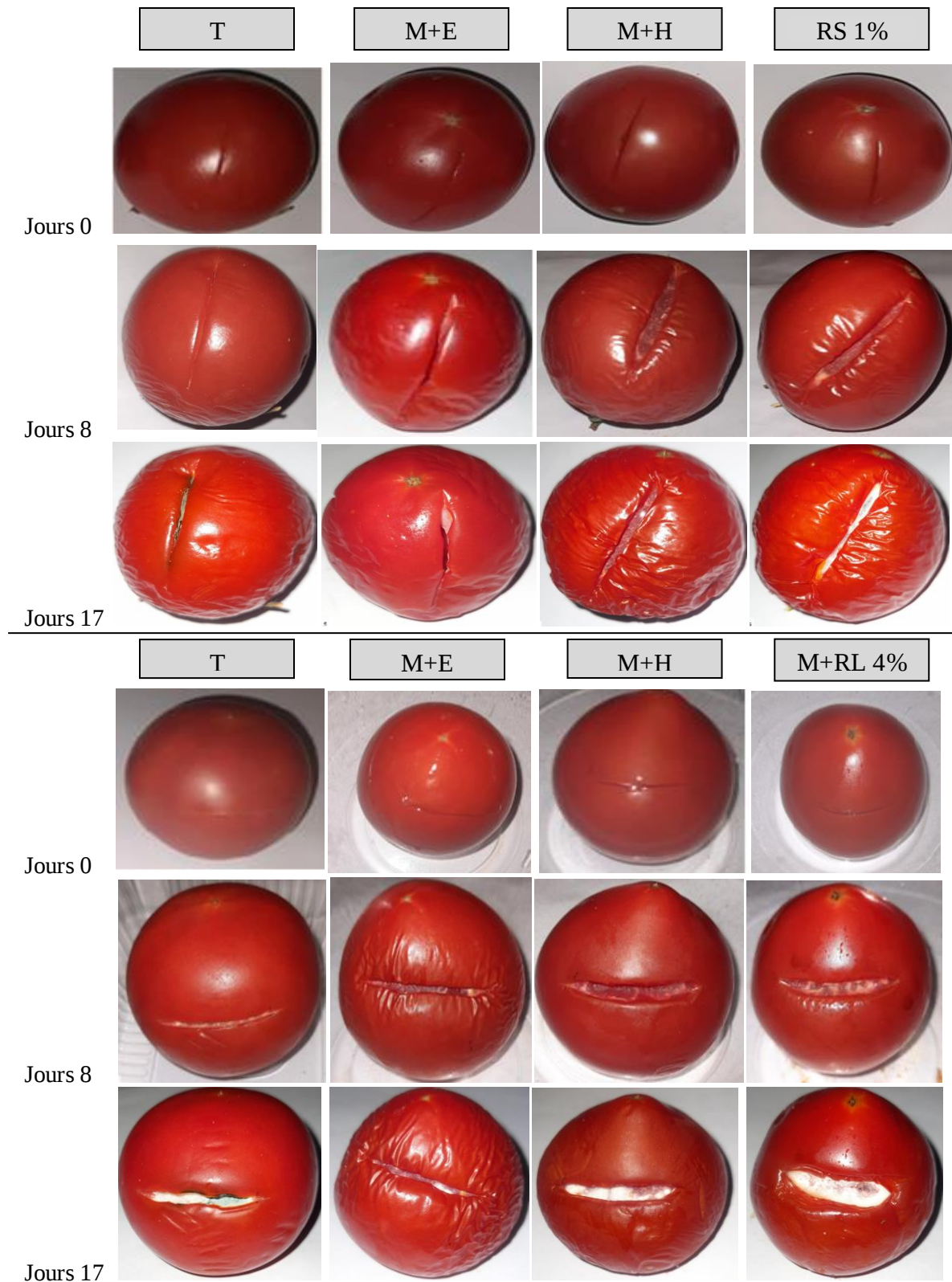


Figure 21. Aspect des tomates enrobées et non enrobées en fonction de la durée de stockage.

T : témoin ; M+E: mucilage + eau ; M+H: mucilage + hydrolat ; M+R: mucilage + résidu

Pour évaluer l'effet antifongique de nos résidus, les tomates ont été traitées avec les résidus solides et liquides à différentes concentrations.

Pour la concentration de 1 % de résidu solide, aucune différence visuelle notable n'a été observée sur les tomates traitées après 8 jours de stockage. À ce stade, aucune moisissure n'était visible, ni sur les échantillons témoins, ni sur ceux traités. En revanche, après 17 jours de conservation, l'apparition de moisissures a été constatée sur l'ensemble des échantillons, y compris ceux traités avec le résidu solide, l'eau et l'hydrolat. Toutefois, les tomates traitées avec l'hydrolat présentaient une croissance fongique plus faible, ce qui suggère la présence de composés antifongiques actifs issus des huiles essentielles.

La concentration du résidu liquide à 4 % n'a pas montré d'effet significatif sur l'inhibition des moisissures. Par conséquent, ces résultats suggèrent que les résidus de *Salvia hispanica* L. possèdent une bonne activité antioxydante, mais une activité antifongique relativement faible.

En revanche, les résultats de Venkatachalam *et al.* (2024) corroborent les travaux antérieurs montrant l'efficacité antifongique des enrobages à base de chitosane, en particulier lorsqu'ils sont combinés à des huiles essentielles. En effet, l'application de revêtements à base de chitosane et de chitosane enrichi en huile essentielle sur les tomates a permis de freiner significativement le développement des levures et des moisissures au cours du stockage. Contrairement aux échantillons témoins de tomates, qui ont présenté une contamination fongique visible dès le sixième jour, les fruits traités sont restés exempts de toute croissance fongique notable jusqu'au quatorzième jour. L'effet antifongique observé était d'autant plus marqué que la concentration en huile essentielle augmentait, soulignant une réponse dose-dépendante et confirmant l'intérêt de ces composés naturels comme agents de conservation antifongiques dans les systèmes d'enrobage comestible appliqués aux tomates.

Ces résultats suggèrent que les films enrichis ont efficacement protégé les fruits, probablement en retardant la déshydratation, en inhibant la croissance microbienne, ou en ralentissant les processus d'oxydation responsables de l'altération (Lindi *et al.*, 2024). La couleur est un facteur clé dans l'acceptation par les consommateurs ; elle constitue donc un paramètre important à prendre en compte dans le développement de nouveaux enrobages comestibles (Muñoz-Tebar *et al.*, 2021).

Conclusion

Face aux enjeux environnementaux liés à l'accumulation des déchets plastiques, la recherche de solutions alternatives durables pour l'emballage alimentaire s'intensifie. Les films et enrobages comestibles apparaissent comme une voie prometteuse, car ils permettent de réduire l'utilisation des plastiques tout en assurant la protection et la conservation des denrées périssables.

Dans cette optique, et dans le cadre de la valorisation des plantes aromatiques et médicinales ainsi que de leurs sous-produits en tant qu'agents fonctionnels dans le domaine agroalimentaire, nous avons choisi la plante chia connue par le nom *Salvia hispanica L.* pour élaborer un biofilm comestible à partir de ses graines. Les résidus issus de l'hydrodistillation de sa partie aérienne ont été exploités pour enrichir le biofilm en composés antioxydants.

Les analyses phytochimiques des résidus solides et liquides ont confirmé la présence de polyphénols dans les deux fractions, avec une teneur particulièrement élevée dans le résidu solide, estimée respectivement à 90,47 et 60,79 $\mu\text{g EAG/mg}$ d'extrait. Il convient toutefois de souligner que la teneur en polyphénols peut varier selon plusieurs facteurs liés à l'origine végétale et aux conditions d'extraction.

Les tests d'application du biofilm sur des fruits modèles (bananes et tomates) ont montré une amélioration significative de leur durée de conservation par rapport aux témoins non traités. Les fruits enrobés ont mieux conservé leur couleur et leur intégrité physique, contrairement aux témoins qui présentaient un rétrécissement et un brunissement notables. L'incorporation de ces coproduits végétaux dans la matrice du biofilm a ainsi conféré au matériau des propriétés antioxydantes remarquables, tout en améliorant son efficacité pour la conservation post-récolte.

Ces résultats mettent en évidence le potentiel du mucilage de chia et de ses dérivés dans le développement de biomatériaux actifs, biodégradables et comestibles, pouvant constituer une alternative durable aux emballages plastiques conventionnels. Cependant Ce travail ouvre plusieurs perspectives intéressantes. Il est notamment nécessaire de :

- ✓ Poursuivre l'amélioration de la formulation, en vue de renforcer ses propriétés mécaniques, barrière et performances antioxydantes et antimicrobiennes.
- ✓ Evaluer sa biodégradabilité dans divers environnements (sol, eau, compost) pour en mieux appréhender l'impact environnemental.

- ✓ Etendre les tests d'application à d'autres fruits ou denrées périssables, pour valider l'universalité et l'efficacité du film dans différents contextes de conservation.
- ✓ Mener des études toxicologiques et sensorielles approfondies afin de garantir la sécurité alimentaire et l'acceptabilité du biofilm par les consommateurs.

Ce travail met en lumière le potentiel des sous-produits végétaux dans le développement de films alimentaires présentant une double valeur : d'une part, ils constituent une alternative biodégradable et comestible aux emballages plastiques traditionnels ; d'autre part, ils permettent de valoriser des coproduits végétaux en leur conférant une nouvelle fonction, répondant ainsi aux exigences de l'économie circulaire et du développement durable. Cette approche contribue également à la réduction des pertes post-récolte, un enjeu majeur dans la chaîne agroalimentaire.

Références bibliographiques

- Abdelhalim, A., & Hanrahan, J. (2021). Chapter 7 - Biologically active compounds from Lamiaceae family : Central nervous system effects. In Atta-ur-Rahman (Éd.), *Studies in Natural Products Chemistry* (Vol. 68, p. 255-315). Elsevier.
- Abdullah, A. (2015). Comparison of total phenolic content and antioxidant activity in different *Salvia* species using three model systems. *Industrial Crops and Products*.
- Alimpic, A., Oaldje, M., Matevski, V., Marin, P. D., & Duletic-Lausevic, S. (2014). Antioxidant activity and total phenolic and flavonoid contents of *Salvia amplexicaulis* Lam. Extracts. *Archives of Biological Sciences*, 66(1), 307-316.
- Alkan, D., & Yemenicioğlu, A. (2016). Potential application of natural phenolic antimicrobials and edible film technology against bacterial plant pathogens. *Food Hydrocolloids*, 55, 1-10.
- Aslam, A., Mona Hassan, S., Sharif Mughal, S., Khurram Hassan, S., Ibrahim, A., Hassan, H., Raza Ayub, A., & Shafiq, S. (2020). Comprehensive Review of Structural Components of *Salvia hispanica* & Its Biological Applications. *International Journal of Biochemistry, Biophysics & Molecular Biology*, 5(1), 1.
- Beddou, F. (2015). *Etude phytochimique et activités biologiques de deux plantes sahariennes Rumex vesicarius L. et Anvillea radiata Coss et Dur* [Thèse doctorat en biologie cellulaire et biochimie]. Université Abou Bekr Belkaid.
- Beikzadeh, S., Khezerlou, A., Jafari, S. M., Pilevar, Z., & Mortazavian, A. M. (2020). Seed mucilages as the functional ingredients for biodegradable films and edible coatings in the food industry. *Advances in Colloid and Interface Science*, 280, 102164.
- Bourgou, S., Beji, R. S., Medini, F., Ksouri, R., Abdelhamid, S., Omri, A., Grati-Kamoun, N., Marra, F. P., & Caruso, T. (2016). Effet du solvant et de la méthode d'extraction sur la

teneur en composés phénoliques et les potentialités antioxydantes d'Euphorbia helioscopia. *Journal of New Sciences*, 28.

Charles-Rodríguez, A. V., Rivera-Solís, L. L., Martins, J. T., Genisheva, Z., Robledo-Olivo, A., González-Morales, S., López-Guarín, G., Martínez-Vázquez, D. G., Vicente, A. A., & Flores-López, M. L. (2020). Edible Films Based on Black Chia (*Salvia hispanica* L.) Seed Mucilage Containing Rhus microphylla Fruit Phenolic Extract. *Coatings*, 10(4), 326.

Cheriot, S. (2007). *Rôle des produits de la réaction de Maillard dans l'inhibition de l'oxydation enzymatique des phénols et des lipides*. AgroParisTech.

da Silveira Ramos, I. F., Magalhães, L. M., do O Pessoa, C., Pinheiro Ferreira, P. M., dos Santos Rizzo, M., Osajima, J. A., Silva-Filho, E. C., Nunes, C., Raposo, F., Coimbra, M. A., Ribeiro, A. B., & Costa, M. P. (2021a). Nouvelles propriétés du mucilage de graines de chia (*Salvia hispanica* L.) et application potentielle dans les produits cosmétiques et pharmaceutiques. *Industrial Crops and Products*, 171, 113981.

de Elguea-Culebras, G. O., Bravo, E. M., & Sánchez-Vioque, R. (2022). Potential sources and methodologies for the recovery of phenolic compounds from distillation residues of Mediterranean aromatic plants. An approach to the valuation of by-products of the essential oil market – A review. *Industrial Crops and Products*, 175, 114261.

Deghima, A., Righi, N., Conrado, N. R., María Eugenia Leon, G., Mejía, E. G., Madrid, Y., Baali, F., & Bedjou, F. (2020). Bioactive polyphenols from *Ranunculus macrophyllus* Desf. Roots : Quantification, identification and antioxidant activity. *South African Journal of Botany*, 132, 1-11.

- Deshmukh, R. K., Tripathi, S., Bisht, S., Kumar, P., Patil, T. D., & Gaikwad, K. K. (2025). Mucilage-based composites films and coatings for food packaging application : A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 300, 140276.
- Dib, H., Seladji, M., Bencheikh, F. Z., Faradji, M., Benammar, C., & Belarbi, M. (2021). Phytochemical Screening and Antioxidant Activity of *Salvia hispanica*. *Journal of Pharmaceutical Research International*, 167-174.
- Dick, M., Costa, T. M. H., Gomaa, A., Subirade, M., Rios, A. de O., & Flôres, S. H. (2015). Edible film production from chia seed mucilage : Effect of glycerol concentration on its physicochemical and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers*, 130, 198-205.
- Djeridane, A., Yousfi, M., Nadjemi, B., Boutassouna, D., Stocker, P., & Vidal, N. (2006). Antioxidant activity of some algerian medicinal plants extracts containing phenolic compounds. *Food Chemistry*, 97(4), 654-660.
- Dziadek, K., Kopeć, A., Dziadek, M., Sadowska, U., & Cholewa-Kowalska, K. (2022). The Changes in Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of Chia (*Salvia hispanica* L.) Herb under Storage and Different Drying Conditions : A Comparison with Other Species of Sage. *Molecules*, 27(5).
- Et-Touys, A., Fellah, H., Mniouil, M., Bouyahya, A., Dakka, N., Abdennebi, E. H., Sadak, A., & Bakri, Y. (2016). Screening of antioxidant, Antibacterial and Antileishmanial Activities of *Salvia Officinalis* L. Extracts from Morocco. *British Microbiology Research Journal*, 16(5), 5.
- Iacovino, S., Cofelice, M., Sorrentino, E., Cuomo, F., Messina, M. C., & Lopez, F. (2024). Alginate-Based Emulsions and Hydrogels for Extending the Shelf Life of Banana Fruit. *Gels*, 10(4), 245.

- Knez Hrnčič, M., Ivanovski, M., Darija, C., & Željko, K. (2019). Chia Seeds (*Salvia Hispanica* L.): An Overview—Phytochemical Profile, Isolation Methods, and Application. *Molecules*, 25(1).
- Kocira, A., Kozłowicz, K., Panasiewicz, K., Staniak, M., Szpunar-Krok, E., & Hortyńska, P. (2021). Polysaccharides as Edible Films and Coatings : Characteristics and Influence on Fruit and Vegetable Quality—A Review. *Agronomy*, 11(5), 813.
- Kola, V., & Carvalho, I. S. (2023). Plant extracts as additives in biodegradable films and coatings in active food packaging. *Food Bioscience*, 54, 102860.
- Lindi, A. M., Gorgani, L., Mohammadi, M., Hamed, S., Darzi, G. N., Cerruti, P., Fattahi, E., & Moeini, A. (2024). Fenugreek seed mucilage-based active edible films for extending fresh fruit shelf life : Antimicrobial and physicochemical properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 269, 132186.
- Mahdi, S., Azzi, R., & Lahfa, F. B. (2021). Antioxidant Activity and Hemolytic Effect of Hydro-methanolic Extract and its Phenolic Enriched Fractions From Leaves and Stems of *Salvia officinalis* L. from Algeria. *Journal of Natural Product Research and Applications*, 1(02),
- Mahmoudi, S., Khali, M., & Mahmoudi, N. (2013). Etude de l'extraction des composés phénoliques de différentes parties de la fleur d'artichaut (*Cynara scolymus* L.). *Nature & Technologie*, 5(2), 35-40.
- Martins, V., Pintado, M., Morais, R., & Morais, A. (2024). Recent Highlights in Sustainable Bio-Based Edible Films and Coatings for Fruit and Vegetable Applications. *Foods*, 13(2), 318.
- Mensah, E. O., Oludipe, E. O., Gebremeskal, Y. H., Nadtochii, L. A., & Baranenko, D. (2024). Evaluation of extraction techniques for chia seed mucilage; A review on the structural

- composition, physicochemical properties and applications. *Food Hydrocolloids*, 153, 110051.
- Mir, S. A., Dar, B. N., Wani, A. A., & Shah, M. A. (2018). Effect of plant extracts on the technological properties of biodegradable packaging films. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 141-154.
- Motyka, S., Koc, K., Ekiert, H., Blicharska, E., Czarnek, K., & Szopa, A. (2022). The Current State of Knowledge on *Salvia hispanica* and *Salviae hispanicae* semen (Chia Seeds). *Molecules*, 27(4).
- Muñoz, L. A., Aguilera, J. M., Rodriguez-Turienzo, L., Cobos, A., & Diaz, O. (2012). Characterization and microstructure of films made from mucilage of *Salvia hispanica* and whey protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 111(3), 511-518.
- Muñoz-Tébar, N., Carmona, M., Ortiz de Elguea-Culebras, G., Molina, A., & Berruga, M. I. (2022). Chia Seed Mucilage Edible Films with *Origanum vulgare* and *Satureja montana* Essential Oils : Characterization and Antifungal Properties. *Membranes*, 12(2).
- Muñoz-Tebar, N., Molina, A., Carmona, M., & Berruga, M. I. (2021). Use of Chia by-Products Obtained from the Extraction of Seeds Oil for the Development of New Biodegradable Films for the Agri-Food Industry. *Foods*, 10(3), 620.
- Nilofar, Dall'Acqua, S., Sut, S., Baskose, I., Kargılı, U., Orlando, G., & Zengin, G. (2024). Exploring the effects of post-distillation and post-supercritical CO₂ extraction on chemical profile and biological activities of two *Salvia* species (*S. chrysophylla* and *S. microstegia*). *Microchemical Journal*, 198.
- Ozuna, K., Rodríguez-Félix, F., Marquez Rios, E., Moreno-Vásquez, M., Graciano-Verdugo, A., Robles, M., Aubourg-Martínez, S., Quintero-Reyes, I., López, B., & Tapia-Hernández, J.

- (2024). Improving the Properties of Polysaccharide-Based Films by Incorporation of Polyphenols Through Free Radical Grafting : A Review. *Polysaccharides*, 5, 672-697.
- Pires, A. F., Díaz, O., Cobos, A., & Pereira, C. D. (2024). A Review of Recent Developments in Edible Films and Coatings-Focus on Whey-Based Materials. *Foods*, 13(16).
- Pirsa, S., Sani, I. K., & Mirtalebi, S. S. (2022). Nano-biocomposite based color sensors : Investigation of structure, function, and applications in intelligent food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, 100789.
- Prathyusha, P., Kumari, B. A., Suneetha, W. J., & Sai, M. N. (2019). Chia seeds for nutritional security. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(3), 2702-2707.
- Rafya, M., Zehhar, N., Hafidi, A., & Benkhalti, F. (2024). Review of *Rosmarinus officinalis L.* essential oil, hydrosol, and residues analysis: Composition, bioactivities, and valorization. *Industrial Crops and Products*, 221, 119392.
- Ramos, I. F. D. S., Fernandes, V. L., Lucena, M. D. A., Geronço, M. S., Da Costa, M. P., Rizzo, M. D. S., & Ribeiro, A. B. (2023). Chia seed mucilage (*Salvia hispanica L.*): An emerging biopolymer for industrial application. *Brazilian Journal of Development*, 9(1), 2237-2258.
- Righi, N. (2021). *Evaluation de l'activité antioxydante et anti-inflammatoire des extraits de Thymus algeriensis Boiss. Et Reut. Et Salvia verbenaca L.*
- Sabahi, Z., Farmani, F., Mousavinoor, E., & Moein, M. (2020). Valorization of Waste Water of Rosa damascena Oil Distillation Process by Ion Exchange Chromatography. *The Scientific World Journal*, 2020(1), 5409493.
- Salgado-Cruz, Ma. de la P., Calderón-Domínguez, G., Chanona-Pérez, J., Farrera-Rebollo, R. R., Méndez-Méndez, J. V., & Díaz-Ramírez, M. (2013). Caractérisation de la libération de

- mucilage des graines de chia (*Salvia hispanica* L.). Étude microstructurale et analyse d'images. *Industrial Crops and Products*, 51, 453-462.
- Sánchez Vázquez, V. J., Rosado Mendoza, M. A., Rodríguez Gattorno, G., & Segura Campos, M. R. (2025). *Films à base de mucilage de S. hispanica /ZnO : Préparation, caractérisation et application potentielle. Food Hydrocolloids*, 159, 110637.
- Singleton, V. L., & Rossi, Josef A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.
- Skendi, A., Irakli, M., Chatzopoulou, P., Bouloumpasi, E., & Biliaderis, C. G. (2022). Phenolic extracts from solid wastes of the aromatic plant essential oil industry : Potential uses in food applications. *Food Chemistry Advances*, 1, 100065.
- Souilah, N., Belattar, H., & Hamdi, B. (2021). Biochemical properties and in vitro activities of extracts from two Asteraceae endemic species wild (Algeria). *Rhazes: Green and Applied Chemistry*, 11(2), 58-70.
- Thod filho, S., Júnior, Fernando Gomes de Souza., Nunes de lima jorge, E., DE oliveira pinto, E., Dilva de costa, G., & Dias campos, Larissa. (2022). Effect of cassava starch biofilm with diffusion of silver nanoparticles on the conservation of banana « prata ». *Brazilian Journal of Experimental Design, Data Analysis and Inferential Statistics*, 2(1), 1389-1396.
- Tosun, M., Ercisli, S., Sengul, M., Ozer, H., Polat, T., & Ozturk, E. (2009). Antioxidant Properties and Total Phenolic Content of Eight *Salvia* Species from Turkey. *Biological Research*, 42(2).

- Ulewicz-Magulska, B., & Wesolowski, M. (2023). Antioxidant Activity of Medicinal Herbs and Spices from Plants of the Lamiaceae, Apiaceae and Asteraceae Families : Chemometric Interpretation of the Data. *Antioxidants*, 12(12).
- Veličković, D. T., Milenović, D. M., Ristić, M. S., & Veljković, V. B. (2008). Extraction par ultrasons des résidus solides issus de l' hydrodistillation de l'huile essentielle *de Salvia* sp. *Biochemical Engineering Journal*, 42(1), 97-104.
- Venkatachalam, K., Lekjing, S., Noonim, P., & Charoenphun, N. (2024). Extension of Quality and Shelf Life of Tomatoes Using Chitosan Coating Incorporated with Cinnamon Oil. *Foods*, 13(7).
- Ververis, A., Kyriakou, S., Ioannou, K., Chatzopoulou, P. S., Panayiotidis, M. I., Plioukas, M., & Christodoulou, K. (2023). Chemical Profiling and Antioxidant and Anti-Amyloid Capacities of *Salvia fruticosa* Extracts from Greece. *Plants*, 12(18).
- Wang, W.-H., Lu, C.-P., & Kuo, M.-I. (2022). Combination of Ultrasound and Heat in the Extraction of Chia Seed (*Salvia hispanica* L.) Mucilage : Impact on Yield and Technological Properties. *Processes*, 10(3).
- Zeid, E., Ghani, A., Mahmoud, M., & Abdallah, R. (2022). Étude phytochimique et dépistage biologique de la fraction d'acétate d'éthyle des parties aériennes de *Salvia hispanica* L. *Pharmacognosie J Journal*, 14(1), 226-234.

ملخص

في ظل التحديات المتزايدة المرتبطة بالنفايات البلاستيكية، تُعد الأغشية والأفلام الصالحة للأكل بديلاً مستداماً لتغليف المواد الغذائية، مع قدرتها على حماية المنتجات القابلة للتلف والحفاظ عليها. وفي هذا السياق، يهدف هذا العمل إلى تثمين المخلفات الناتجة عن التقطير المائي لنبات *Salvia hispanica L.* (المائي نبات) الغنية بالمركبات النشطة بيولوجياً، من خلال دمجها في أفلام غذائية تعتمد على مخاط بذور الشيا كمادة أساسية. وقد أكدت التحاليل الكيميائية النباتية وجود مركبات البوليفينول في هذه المخلفات. كما أظهرت الأفلام الحيوية المُحضّرة خصائص مضادة للأكسدة وفعالية ملحوظة في إطالة مدة حفظ الموز والطماطم، مقارنةً بالعينات غير المعالجة. تساهم هذه المقاربة في تثمين المخلفات النباتية وتطوير مواد تغليف غذائي صالحة للأكل، قابلة للتحلل الحيوي، وذات وظائف وقائية فعالة.

الكلمات المفتاحية : الأغشية الحيوية الصالحة للأكل، نبتة الشيا، تثمين، مخلفات التقطير المائي، البوليفينولات، حفظ الأغذية.

Abstract

In response to the growing issue of plastic waste, edible films represent a sustainable alternative for food packaging, while ensuring the protection and preservation of perishable goods. In this context, the aim of this study was to valorize residues from the hydrodistillation of *Salvia hispanica L.* (Chia), which are rich in bioactive compounds, by incorporating them into biofilms based on chia seed mucilage. Phytochemical analyses confirmed the presence of polyphenols in these residues. The resulting biofilms exhibited antioxidant properties and demonstrated notable effectiveness in extending the shelf life of bananas and tomatoes compared to untreated controls. This approach contributes both to the valorization of plant-based by-products and to the development of edible, biodegradable, and functional packaging materials.

Keywords: Edible biofilms, *Salvia hispanica L.*, valorization, hydrodistillation residues, polyphenols, preservation.

Résumé

En réponse à la problématique croissante des déchets plastiques, les films comestibles représentent une alternative durable pour l'emballage alimentaire tout en assurant la protection et la conservation des denrées périssables. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est de valoriser les résidus issus de l'hydrodistillation de *Salvia hispanica L.* (Chia), en les intégrant dans des biofilms à base de mucilage de graines de chia. Les analyses phytochimiques ont confirmé la présence des composées bioactives comme les polyphénols dans ces résidus. Les biofilms ainsi formulés ont montré des propriétés antioxydantes et une efficacité notable dans la conservation des bananes et tomates, en prolongeant leur durée de vie par rapport aux témoins non traités. Cette approche contribue à la fois à la valorisation de coproduits végétaux et à la création de matériaux d'emballage comestibles, biodégradables et fonctionnels.

Mots-clés : Biofilms comestibles, *Salvia hispanica L.*, valorisation, résidus de hydrodistillation, polyphénols, conservation.



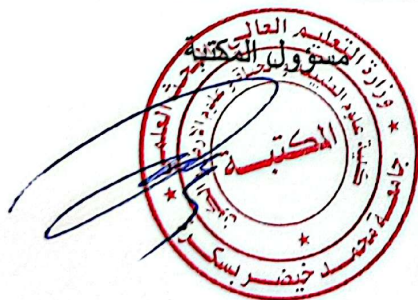
Déclaration de correction de mémoire de master 2025

Référence du mémoire N°: / 2025	PV de soutenance N°: / 2025
Nom et prénom (en majuscule) de l'étudiant (e) : M.AANSEER FERTAL MATALLAH MOHAMMED	L'élève (le) : M.AANSEER FERTAL MATALLAH MOHAMMED
La mention :	Note (sur 20) :
L'intitulé de mémoire : Valorisation des résidus de l'hydrodistillation de la plante Sida acuminata pour le développement d'un biofilm alimentaire enrichi en composés phénoliques	

Déclaration et décision de l'enseignant promoteur : تصريح وقرار الأستاذ المشرف :

Déclaration : Je soussigné (e), (grade) à l'université de....., avoir examiné intégralement ce memoire après les modifications apportées par l'étudiant. J'atteste que : * le document a été corrigé et il est conforme au model de la forme du département SNV * toutes les corrections ont été faites strictement aux recommandations du jury. * d'autres anomalies ont été corrigées	تصريح : أنا الممضي (ة) أسفله (الرتبة) أصريح بأنني راجعت محتوى هذه المذكرة كليا مراجعة دقيقة وهذا بعد التصحيحات التي أجراها الطالب بعد المناقشة، وعليه أشهد بأن : * المذكرة تتوافق بشكلها الحالي مع النموذج المعتمد لقسم علوم الطبيعة والحياة. * المذكرة صحيحة وفقا لكل توصيات لجنة المناقشة * تم تدارك الكثير من الإختلالات المكتشفة بعد المناقشة
--	--

Décision : Sur la base du contenu scientifique, de degré de conformité et de pourcentage des fautes linguistiques, Je décide que ce mémoire doit être classé sous la catégorie	قرار : اعتمادا على درجة مطابقتها للنموذج، على نسبة الأخطاء اللغوية وعلى المحتوى العلمي أقرر أن تصنف هذه المذكرة في الدرجة :												
<table border="1"> <tr> <td>acceptable مقبول</td> <td>ordinaire عادي</td> <td>bien حسن</td> <td>très bien جيد جدا</td> <td>excellent ممتاز</td> <td>exceptionnel متميز</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>D</td> <td>C</td> <td>B</td> <td>A</td> <td>A+</td> </tr> </table>	acceptable مقبول	ordinaire عادي	bien حسن	très bien جيد جدا	excellent ممتاز	exceptionnel متميز	E	D	C	B	A	A+	
acceptable مقبول	ordinaire عادي	bien حسن	très bien جيد جدا	excellent ممتاز	exceptionnel متميز								
E	D	C	B	A	A+								



الأستاذ المشرف

(Signature)

التاريخ

2025 / 06 / 13

NB : Cette fiche doit être collée d'une façon permanente derrière la page de garde sur les copies de mémoire déposées au niveau de la bibliothèque universitaire